

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LISANDRA MARIA ALVES MATOS

APLICAÇÕES DA PESQUISA OPERACIONAL NO MANEJO E PLANEJAMENTO
FLORESTAL

CURITIBA

2020

LISANDRA MARIA ALVES MATOS

APLICAÇÕES DA PESQUISA OPERACIONAL NO MANEJO E PLANEJAMENTO
FLORESTAL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração de Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof.Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Prof.Dr. Carlos Alberto Araújo Júnior

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Matos, Lisandra Maria Alves

Aplicações da pesquisa operacional no manejo e planejamento florestal
/ Lisandra Maria Alves Matos. - Curitiba, 2020.

71 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Araújo Júnior

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 09/09/2020.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Florestas - Manejo - Modelos matemáticos. 2. Pesquisa operacional.
3. Programação (Matemática). 4. Florestas - Planejamento - Modelos
matemáticos. 5. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Araújo Júnior, Carlos
Alberto. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias.
IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.51

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LISANDRA MARIA ALVES MATOS** intitulada: **APLICAÇÕES DA PESQUISA OPERACIONAL NO MANEJO E PLANEJAMENTO FLORESTAL**, sob orientação do Prof. Dr. JULIO EDUARDO ARCE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 09 de Setembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

09/09/2020 14:49:20.0

JULIO EDUARDO ARCE

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/09/2020 12:23:44.0

LUCAS REZENDE GOMIDE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS)

Assinatura Eletrônica

09/09/2020 17:33:01.0

ARINEI CARLOS LINDBECK DA SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

À minha mãe Marisa, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, agradeço pelos momentos bons e ruins. Cada um deles, ao seu modo, me fizeram chegar até aqui. Obrigada por sempre cuidar de mim.

À minha mãe Marisa e meus irmãos Larissa, Filipe e Gabriel por sempre me apoiarem onde quer que meus sonhos me levem. À minha avó Piedade, aos meus tios e primos e à família Siqueira, por compreenderem os períodos de ausência e pelo incentivo à jamais desistir. Amo todos vocês, família.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal por proporcionarem um ensino de alta qualidade.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo suporte financeiro.

À Suzano SA por disponibilizarem os dados para a pesquisa e por todo o apoio e compreensão pela jornada dupla, principalmente ao meu gerente João Miguel e à supervisora Soraia Chicon.

Ao meu orientador Julio pela oportunidade, conhecimento transmitido e por ter compreendido e aceitado meu plano de carreira. Ao professor Arinei Silva, Edgar Krast e Cleder Schenekemberg pela parceria e desenvolvimento da parte matemática e conselhos sobre a solução do problema.

Ao meu coorientador e amigo Carlos por todo o auxílio e suporte no desenvolvimento e escrita do trabalho e, antes de tudo, por me incentivar a começar. Seus puxões de orelha vêm me ensinando desde a graduação e espero que mesmo sem o enlace de orientação, continuemos com essa amizade que prezo tanto.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Manejo Florestal, por terem me recebido tão bem e pela rede de apoio e companheirismo que formam.

Aos amigos que se fizeram minha família em Curitiba. Maycon, pelas pipocas e sorvetes, Hellen pela irmandade, Rudson pelos stand-ups e papos aleatórios sobre signo e finanças, Cícero pelos bolos e por namorar a melhor pessoa do mundo, Anna pelos sorrisos e chimarrão, Mirella pelos conselhos e festa de pijama, Chai pelas risadas e Mônica pelos pinhões e inspiração para eu ser uma pessoa mais consciente. Sem vocês não teria sido a mesma coisa.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste estudo. Foi uma jornada de tropeços, vitórias e derrotas que me fizeram enxergar a dádiva que é aprender.

“Sinto mil capacidades brotarem em mim.”

Virginia Woolf

RESUMO

A utilização de técnicas de Pesquisa Operacional têm sido cada vez mais frequente no manejo florestal dado o desafio de se assegurar a competitividade do produto florestal pelo aumento da produtividade e redução dos custos do processo de produção. Para entender melhor a atual conjuntura dessas ferramentas no âmbito acadêmico, o primeiro capítulo desse trabalho apresenta uma análise crítica da produção científica a partir de um levantamento bibliográfico em revistas brasileiras de alto impacto no setor florestal buscando tendências e identificando lacunas que podem ser objetos de futuros estudos. Um dos fatos constatados no primeiro capítulo foi que, apesar das técnicas de pesquisa operacional estarem difundidas no nível estratégico e até mesmo no tático, no nível operacional pouco se estuda. Em função disso, esse trabalho descreve no seu segundo capítulo a aplicação de um modelo de otimização em um problema operacional de planejamento operacional da colheita florestal. Os resultados indicaram que é possível obter uma solução viável matematicamente para um problema à nível operacional, mesmo com toda a complexidade que ele implica.

Palavras-Chave: Programação Matemática.

ABSTRACT

The use of Operations Research techniques has been increasingly frequent in forest management given the challenge of ensuring the competitiveness of the forest product by increasing productivity and reducing the costs of the production process. To better understand the current situation of these tools in the academic sphere, the first chapter of this work presents a critical analysis of scientific production from a bibliographic survey in Brazilian journals of high impact in the forest sector seeking trends and identifying gaps that may be the object of future studies. One of the facts found in the first chapter was that, although operational research techniques are disseminated at the strategic and even tactical level, little is studied at the operational level. As a result, this work describes in its second chapter the application of an optimization model to an operational problem of forest harvesting planning. The results indicated that it is possible to obtain a mathematically feasible solution to a problem at the operational level, even with all the complexity it entails.

Keywords: Mathematical Programming.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
REFERÊNCIAS	13
CAPÍTULO I: UMA ANÁLISE CRÍTICA DAS FERRAMENTAS DE PESQUISA OPERACIONAL APLICADA AO PLANEJAMENTO FLORESTAL NO BRASIL	
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	16
2 MATERIAL E MÉTODOS	19
2.1 CATEGORIZAÇÃO	19
3 RESULTADOS	22
4 DISCUSSÃO	28
5 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34
CAPÍTULO II: APLICAÇÃO DE UM MODELO DE PESQUISA OPERACIONAL EM UM PROBLEMA DE PLANEJAMENTO ANUAL DE COLHEITA FLORESTAL	
RESUMO	40
ABSTRACT	41
1 INTRODUÇÃO	42
2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	45
2.2 PLANEJAMENTO E MODELO ATUAL DO AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL	46
2.3 MODELO PROPOSTO PARA AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL ..	48
2.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
3 RESULTADOS	53
4 DISCUSSÃO	58
5 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	62

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	64
REFERÊNCIAS GERAIS	65

1 INTRODUÇÃO

O manejo florestal está associado à utilização de forma sustentável e sensata dos recursos florestais, de maneira que as gerações futuras possam usufruir ao menos dos mesmos benefícios da geração presente (SCOLFORO, 1998). Nesse contexto, é necessário que os gestores florestais conheçam as técnicas de planejamento e reconheçam sua importância para o sucesso do empreendimento. É por meio do planejamento que é possível organizar, racionalizar e otimizar as operações, tornando possível abordar todos os fatores que podem atingir positivamente ou negativamente as atividades, identificando e antecipando alguns problemas que viriam a afetá-las. Em geral, o planejamento é feito seguindo uma estrutura hierárquica, sendo dividido em estratégico, tático e operacional.

A necessidade de excelência no planejamento, desde o nível estratégico até o operacional, para empreendimentos florestais tem tornado o manejo florestal uma arte desafiadora (DAVID *et al.*, 2017). Essa exigência vem do fato de que, apesar dos aumentos crescentes de produtividade, os custos setoriais têm feito com que a produção de madeira tenha se tornado mais cara nos últimos anos (FERRARI *et al.*, 2019). Conseqüentemente, garantir a competitividade do setor se torna um desafio, principalmente quando o produto depende do mercado de exportação (RÖNNQVIST, 2003). Isso faz com que sejam necessárias ferramentas de auxílio ao gerenciamento do negócio, pois decisões inadequadas podem inviabilizar economicamente o projeto florestal (DAVID, 2014).

É no contexto de otimizar a produção florestal, sem exacerbar os recursos envolvidos na cadeia, que se torna fundamental o uso de ferramentas que deem subsídio para análise de resultados, principalmente pela redução de riscos e incertezas quanto ao gerenciamento do empreendimento florestal. Destaca-se aqui o uso de técnicas de Pesquisa Operacional (PO) as quais auxiliam o processo de tomada de decisão através da utilização de modelos matemáticos que representam a realidade e fornecem resultados baseados em um processo científico, racional e lógico. Apesar do fato de que a implementação de cada ferramenta varia em função do tipo de problema e do ambiente considerado, a metodologia da PO utiliza seis fases (BELFIORE & FÁVERO, 2013): (1) formular o problema; (2) construir um modelo matemático para representar o sistema; (3) deduzir uma solução do modelo; (4) testar

o modelo e a solução; (5) colocar a solução em funcionamento; e (6) estabelecer controle sobre a solução.

No Brasil, as ferramentas que utilizam de técnicas de Pesquisa Operacional têm tomado um espaço significativo. O país foi o mais representado em uma pesquisa sobre métodos de otimização na gestão florestal industrial conduzida por pesquisadores espanhóis (BELAVENUTTI *et al.*, 2018). Os autores verificaram que problemas florestais brasileiros estavam presentes em cerca de 38% dos artigos consultados, à frente de países como Espanha, Chile, Colômbia, Cuba, México, Nova Zelândia e Venezuela. Entretanto, apesar disso e da importância do país no âmbito florestal, não foi encontrado um trabalho exclusivamente focado na utilização da PO no manejo florestal brasileiro.

De maneira geral, a possibilidade de usar madeira de espécies do gênero *Eucalyptus*. levou grandes e pequenas empresas a estabelecerem florestas com a espécie (GONÇALVES *et al.*, 2013). E apesar de as técnicas de pesquisa operacional serem amplamente utilizadas no planejamento estratégico, são poucos os trabalhos científicos que abordam modelos matemáticos de planejamento operacional.

Dessa forma, a fim de sanar as lacunas mencionadas, este trabalho propõe-se a realizar:

1 - uma Análise Crítica das Ferramentas de Pesquisa Operacional Aplicada do Planejamento Florestal no Brasil e uma

2 - aplicação de um modelo de programação matemática em um Problema de Planejamento Anual de Colheita Florestal.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as diferentes abordagens das técnicas de programação matemática no Brasil e sua aplicabilidade em um caso real de uma empresa florestal.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar lacunas na ciência brasileira quanto à trabalho envolvendo pesquisa operacional no manejo florestal, que sejam objetos de futuros estudos.
- Promover uma interface entre a academia e o setor privado florestal, gerando discussões e aprendizado de ambas as partes, disseminando um trabalho científico perante a sociedade.
- Aplicar um modelo matemático para solução de um problema de planejamento operacional da colheita florestal.
- Avaliar a possibilidade de se obter soluções ótimas ou viáveis (a depender da abordagem) matematicamente para o problema citado a partir de sistemas computacionais.

REFERÊNCIAS

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, 2018.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 545 p.

DAVID, H. C.; ARCE, J.E.; OLIVEIRA, E. B.; PÉLLICO NETTO, S.; MIRANDA, R. O. V.; EBLING, A. A. Economic analysis and revenue optimization in management regimes of *Pinus taeda*. **Rev. Ceres**, Viçosa, v.64, n.3, p. 222-231, 2017.

DAVID, H. C. **Avaliação de sítio, relações dendrométricas e otimização de regimes de manejo de Pinus taeda L. nos estados do Paraná e de Santa Catarina**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) -. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FERRARI, L. S.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L. Agendamento tático otimizado da colheita florestal em povoamentos de *Pinus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 167-176, 2019.

GONÇALVES, J. L. de M; ALVARES, C. A. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, ago. 2013.

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical programming**, v. 97, n. 1–2, p. 267–284, 2003.

SCOLFORO, J. S. R. Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas. UFLA/FAEPE, Lavras, 1998, 451 p.

CAPÍTULO I

UMA ANÁLISE CRÍTICA DAS FERRAMENTAS DE PESQUISA OPERACIONAL APLICADA AO PLANEJAMENTO FLORESTAL NO BRASIL

RESUMO

A importância dos métodos de otimização aplicados ao manejo florestal está crescendo nas últimas décadas. Apesar disso, uma questão em aberto é como essas técnicas foram aplicadas ao manejo florestal no Brasil, especificamente. Assim, este trabalho apresenta uma visão geral sobre o comportamento da ciência florestal brasileira nesse aspecto, indicando tendências e lacunas que podem servir de substrato para futuros estudos. Os periódicos consultados foram selecionados a partir do Journal Citation Reports e os artigos foram analisados em termos do banco de dados utilizado (se real ou teórico), gênero das espécies cultivadas, nível de planejamento (estratégico, tático ou operacional), modelo de planejamento, método utilizado para resolver o problema proposto (programação matemática clássica ou metaheurísticas), tipo de função objetivo e categoria de restrições. Como resultado, foram encontrados 44 artigos publicados no período de 1976 a 2020. Os tipos de dados que predominaram foram os reais nos últimos anos, o que indica uma aproximação da academia no âmbito empresarial. As espécies exóticas tiveram maior participação nos estudos que as nativas. O planejamento estratégico é mais abordado, seguido do tático e por último o operacional. Quanto aos métodos, observou-se uma tendência em se utilizar combinações entre métodos clássicos e heurísticas. A função objetivo que mais foi aplicada foi a de maximizar a receita e a restrição envolvendo produção volumétrica. Portanto, foi possível identificar tendências e lacunas e analisar os resultados em uma visão crítica.

Palavras-Chave: Visão Geral. Planejamento Florestal. Programação Matemática.

CHAPTER I

A CRITICAL REVIEW OF OPERATIONS RESEARCH TOOLS APPLIED TO FOREST MANAGEMENT IN BRAZIL

ABSTRACT

The importance of optimization methods applied to forest management is growing in recent decades. Nevertheless, an open question is how these techniques have been applied to forest management in Brazil, specifically. Thus, this paper presents an overview of the behavior of Brazilian forest science in this aspect, indicating trends and gaps that may serve as a substrate for future studies. The journals consulted were selected from the Journal Citation Reports and the articles were analyzed in terms of the database used (whether real or theoretical), genus of the species cultivated, level of planning (strategic, tactical or operational), planning model, method used to solve the proposed problem (classical mathematical programming or metaheuristics), type of objective function and category of constraints. As a result, 44 articles were found published from 1976 to 2020. The types of data that predominated were the real ones in the last years, which indicates an approximation of the academy in the business field. Exotic species had a greater participation in the studies than native species. Strategic planning is more addressed, followed by tactics and finally operations. As for methods, a tendency was observed to use combinations between classical and heuristic methods. The objective function that was most applied was to maximize revenue and restriction involving volumetric production. Therefore, it was possible to identify trends and gaps and analyze the results in a critical view.

Keywords: Overview. Forest Planning. Mathematical Programming.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas de produção e planejamento mais avançadas tem crescido nas atividades florestais, permitindo usos mais apropriados de uma forma econômica e sustentável. Apesar disso, estudos analisando ferramentas de otimização usadas no manejo florestal são escassos (BELAVENUTTI *et al.*, 2018). Ainda assim, é possível encontrar algumas revisões de literatura sobre o quão frequentes as decisões baseadas na diversidade e no tamanho da floresta têm se tornado ao longo dos anos.

Um exemplo de revisão que apresenta este tipo de abordagem é o de Bettinger & Chung (2004), a qual mostra um levantamento completo sobre planejamento florestal auxiliado pela pesquisa operacional na literatura norte-americana. Shan *et al.* (2009) também pesquisaram sobre o estado da arte, tendências e lacunas na utilização de ferramentas de otimização para solução de problemas do manejo florestal em todo o mundo. Como apresentado por eles, os modelos e restrições tem se tornado cada vez mais complexos, o que abre portas para a realização de estudos que tem como objetivo analisar quais ferramentas têm sido utilizadas para a resolução desses problemas. Esses estudos servem como uma base para gestores aplicarem o que é mais apropriado para cada contexto, pois, devido às diferentes formas de otimização existentes, as florestas podem ser conduzidas de forma diferente dependendo das especificações dos modelos.

Embora existam vários artigos com a aplicação de técnicas de pesquisa operacional no vasto campo do manejo florestal (BELAVENUTTI *et al.*, 2018), até então, não há nenhuma análise especialmente focada no manejo florestal brasileiro. 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; FERREZ *et al.*, 2015; VENEGAS-GONZÁLEZ *et al.*, 2016), seja pela representatividade na produção industrial do país. Para exemplificar, e de acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2017), no seu último relatório, os plantios florestais ocupam 7,84 milhões de hectares e representam menos de 1% do território nacional. Esta pequena parcela é responsável por mais de 90% da demanda de madeira para fins produtivos e 6,2% do Produto Interno Bruto

(PIB) industrial. De uma perspectiva acadêmica, o Brasil foi o país mais representado numa pesquisa sobre métodos de otimização na gestão florestal industrial (BELAVENUTTI et al., 2018). Os autores verificaram que o Brasil representava quase 38% dos artigos, estando à frente de países como Espanha, Chile, Colômbia, Cuba, México, Nova Zelândia e Venezuela.

Modelos modernos de otimização e manejo tem se tornado atraentes e usados nas últimas décadas no país, sendo relevante estudar quais instrumentos de pesquisa operacional têm sido aplicados e compará-los com aqueles encontrados nas análises que levam em consideração outros países.

Estudos científicos representam a direção que a ciência tem tomado em cada país, o que permite identificar as prioridades que o desenvolvimento científico nacional escolhe. Conhecer esta característica é de extrema importância para que possíveis lacunas sejam corrigidas e áreas menos favorecidas possam despertar o interesse dos cientistas para uma maior interação entre pesquisadores de diferentes áreas.

A concentração de pesquisadores em uma área específica de estudo pode aumentar o desenvolvimento de tal área, contudo, se não existe nenhuma integração entre pesquisadores, estudos semelhantes podem ser desenvolvidos de forma completamente independente, mas atingindo o mesmo progresso científico, o que não é desejável na maioria dos casos.

Além disso, espera-se que as pesquisas sejam direcionadas a responder perguntas dos problemas do manejo florestal quando se trata de implantações ou plantios reformados, principalmente devido ao alto investimento que existe nesta atividade. Contudo, considerando que o país abriga a maior parte da Amazônia, a maior floresta tropical do mundo, além de vários outros biomas, as descobertas feitas no campo da otimização devem ser aplicadas e desenvolvidas para uma gestão florestal verdadeiramente sustentável nesses locais. Assim, para que isso seja esclarecido, é necessário que estudos científicos de análise da produção, tais como o aqui proposto, sejam efetuados.

Desta forma, este estudo teve como objetivo analisar as aplicações de técnicas da pesquisa operacional no manejo florestal brasileiro e examinar de maneira crítica quais problemas estão sendo apresentados como os mais importantes. Busca-se, assim, retratar como estas técnicas têm sido aplicadas no Brasil, não objetivando

descrever como os problemas foram estruturados ou como os modelos foram concebidos. Além disso, objetiva-se compreender as lacunas e propor objetos de novas pesquisas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada exclusivamente em revistas brasileiras que constam na base de dados Journal Citation Reports (JCR) – que indica quais revistas são mais relevantes na área acadêmica mundialmente – de 2016 em diante na categoria florestal. Nenhum livro ou capítulo de livro foi considerado.

As revistas foram consultadas através da plataforma de investigação digital CAPES – Periódico CAPES – na qual foram introduzidos os seguintes termos: gestão florestal; planejamento florestal; regulação florestal e otimização florestal. Realizou-se uma extensa revisão bibliográfica toda vez que havia uma indicação de conteúdo relevante sobre técnicas de pesquisa operacional aplicadas ao manejo florestal na edição da revista naquele momento.

2.1 CATEGORIZAÇÃO

Assim que os trabalhos foram selecionados, foi feita uma categorização completa seguindo o esquema sugerido por Belavenutti *et al.* (2018).

Assim sendo, os estudos foram analisados com base nos seguintes aspectos: (a) base de dados; (b) gênero; (c) níveis hierárquicos; (d) o modelo de planejamento; (e) os métodos usados; (f) funções objetivo; e (g) categorias de restrições.

A base de dados refere-se à um banco de dados hipotético ou se o cientista dispunha de dados reais.

O gênero foi separado entre exótica e nativa, mas com levantamento de alguma tendência dentre essas categorias macro.

Os níveis de planejamento são classificados hierarquicamente (BANHARA *et al.*, 2010) e seguem uma definição clássica de acordo com o horizonte de planejamento do problema. São classificados como: estratégicos, táticos e operacionais. Além disso, nesta pesquisa, considerou-se a combinação entre eles (estudos que combinam mais de um nível de planejamento). Os problemas de nível estratégico foram classificados conforme nomenclatura de Johnson and Scheurman (1977): Modelos tipo I e II.

Para melhor identificação dos métodos utilizados para construção dos modelos relatados nos estudos, as técnicas de otimização foram divididas em categorias e subcategorias (QUADRO 1).

QUADRO 1 - CATEGORIAS DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DE ARTIGOS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL.

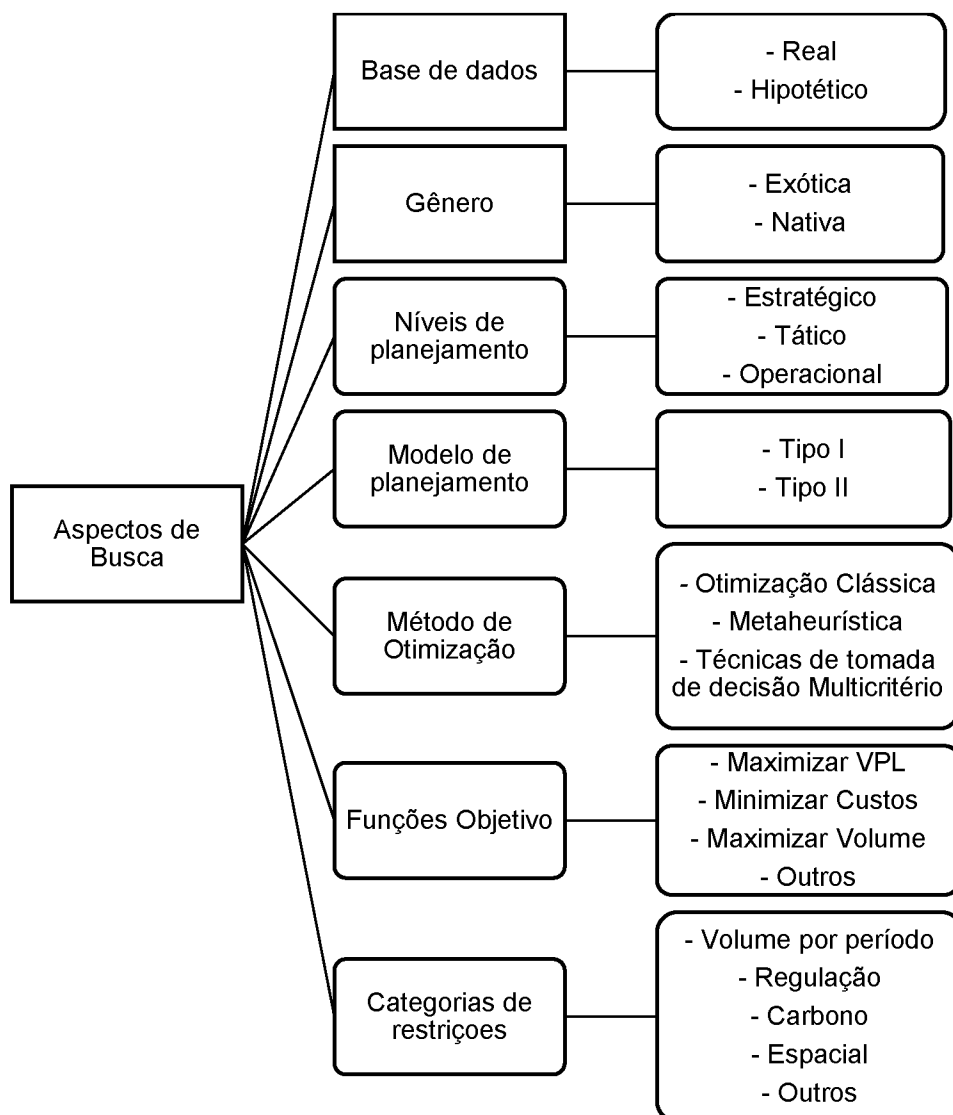
Categorias	Subcategorias
Técnicas Clássicas de Otimização (TCO)	<ul style="list-style-type: none"> • Programação Linear • Programação Inteira • Programação Linear Mista • Programação Dinâmica
Metaheurísticas (MH)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Simulated Annealing</i> • Algoritmo Genético • Busca Tabu
Técnicas de tomada de decisão Multicritério (MCDM)	<ul style="list-style-type: none"> • Programação por Metas

FONTE: A autora (2020)

As funções objetivo foram caracterizadas em: Maximizar Receita, Fluxo de Madeira, Minimizar Custos, e o que foi chamado de “outros”, que envolveu todos os objetivos que não foram assumidos previamente, como as seguintes categorias de restrições: espacial, carbono, volume por período, e outros. E as restrições foram enquadradas nas seguintes categorias: Volume por Período, Regulação, Carbono, Espacial e “outros”.

Quando as pesquisas foram conduzidas através do método descrito anteriormente e resumido na figura abaixo (FIGURA 1), as contribuições que têm sido feitas até o momento na pesquisa operacional aplicada ao manejo florestal no Brasil foram sintetizadas e analisadas.

FIGURA 1 - RESUMO DOS ASPECTOS ANALISADOS NESTE ESTUDO.



FONTE: A autora (2020)

Com base nos resumos dos artigos encontrados, foi realizada uma análise gráfica utilizando uma nuvem de palavras. Esta análise é importante para verificar quais as palavras mais citadas nos resumos dos trabalhos com o objetivo de verificar uma tendência em relação à pesquisa científica relacionada ao tema aqui abordado. Para isso, foi usado o pacote “*wordcloud*” (FELLOWS, 2014) no software R.

3 RESULTADOS

As revistas que se enquadravam na metodologia proposta foram a Cerne (publicada pela Universidade Federal de Lavras), Ciência Florestal (publicada pela Universidade Federal de Santa Maria), Revista Árvore (publicada pela Universidade Federal de Viçosa) e a Scientia Forestalis (publicada pelo IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais). Foram encontrados quarenta e quatro artigos científicos publicado, sendo que mais da metade foram encontrados na Árvore (32%) juntamente à Scientia Forestalis (34%), seguidos pela Cerne (20%) e, por último, Ciência Florestal (14%). A relação dos trabalhos é apresentada no QUADRO 2. Dos 35 autores principais, 6 deles são responsáveis por 35% das publicações, não considerando-se co-autores.

QUADRO 2 – TRABALHOS ESTUDADOS NA PESQUISA COM SUAS RESPECTIVAS REVISTAS E ANO DE PUBLICAÇÃO

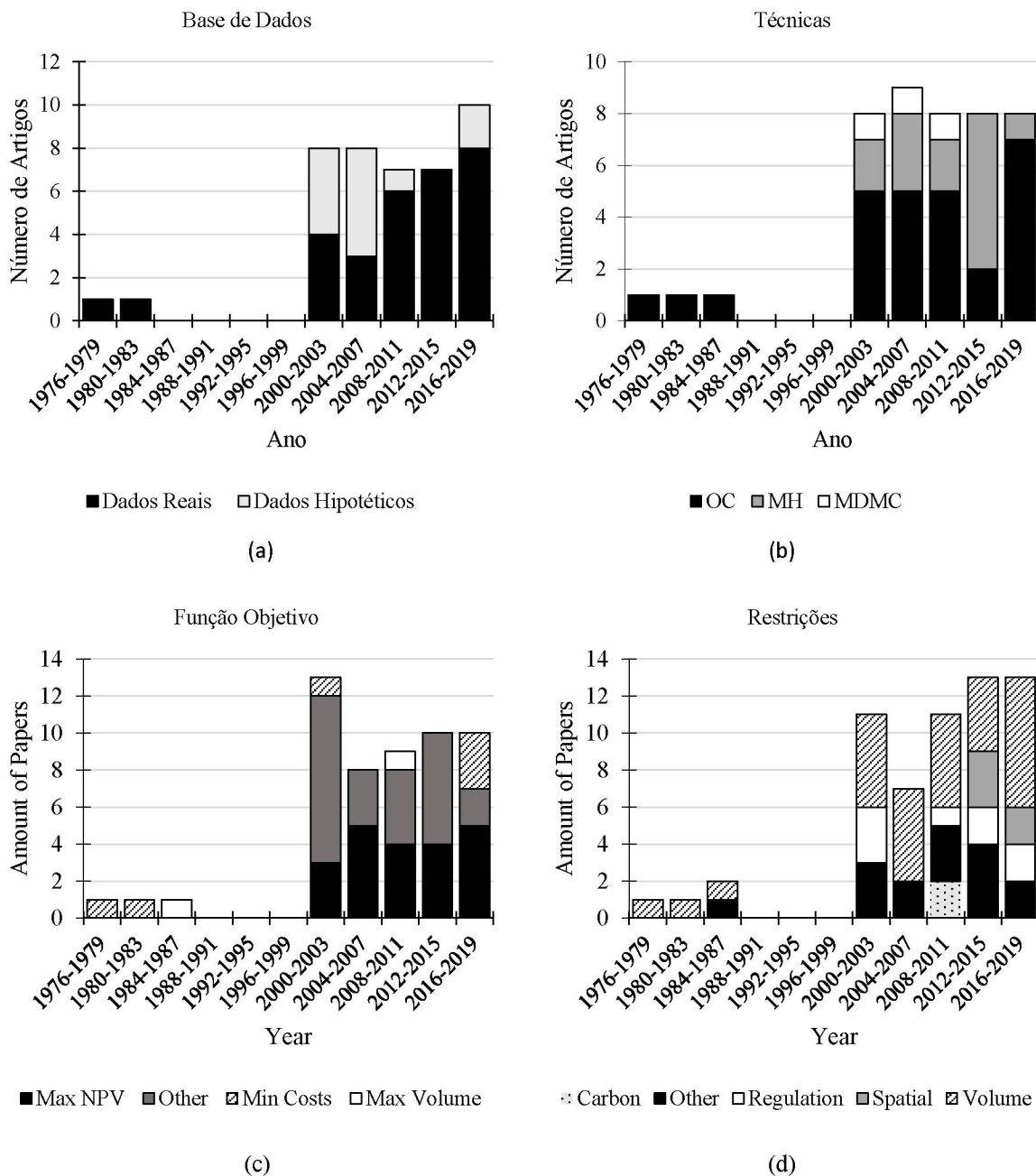
Item	Autores	Ano de publicação	Revista
1	Mello, A. A. et al	2005	Cerne
2	Mello, A. A. et al	2008	Cerne
3	Augustynczyk, A. L. et al	2015	Cerne
4	Araújo Júnior, C. A. et al	2017	Cerne
5	Gomide, L. R. et al	2009	Cerne
6	Lima, M. P. et al	2011	Cerne
7	Silva, P. H. et al	2016	Cerne
8	Binoti, D. H. B. et al	2013	Cerne
9	Rode, R. et al	2016	Cerne
10	Mendonça, A. R. et al	2008	Ciência Florestal
11	Oliveira, F. et al	2002	Ciência Florestal
12	Silva, G. F. et al	2003	Ciência Florestal
13	Gonçalves, J. C. et al	2017	Ciência Florestal
14	Gomide, L. R. et al	2013	Ciência Florestal
15	Zeferino, J. A. et al	2019	Ciência Florestal
16	Augustynczyk, A. L. et al	2017	Árvore
17	Campos, B. P. F. et al	2013	Árvore
18	Braz, E. M. et al	2004	Árvore

19	Rodrigues, F. L. et al	2003	Árvore
20	Rodrigues, F. L. et al	2004	Árvore
21	Rodrigues, F. L. et al	2004	Árvore
22	Rodrigues, F. L. et al	2006	Árvore
23	Silva, G. F. et al	2003	Árvore
24	Marques, G. M. et al	2005	Árvore
25	Arce, J. E. et al	2004	Árvore
26	Silva, M. L. et al	2007	Árvore
27	Barra, O. S. V. et al	2011	Árvore
28	Silva, T. S. et al	2003	Árvore
29	Araújo Júnior, C. A. et al	2017	Árvore
30	Falcão, A. O. et al	2003	Scientia Forestalis
31	Nascimento, F. A. F. et al	2012	Scientia Forestalis
32	Paula Júnior, G. G. et al	1980	Scientia Forestalis
33	Banhara, J. R. et al	2010	Scientia Forestalis
34	Rodriguez, L. C. et al	1985	Scientia Forestalis
35	Fiorentin, L. D. et al	2017	Scientia Forestalis
36	Gomide, L. R. et al	2014	Scientia Forestalis
37	González, L. R. et al	2017	Scientia Forestalis
38	Costa, M. F. et al	2013	Scientia Forestalis
39	Berger, R. et al	1976	Scientia Forestalis
40	Sousa, R. A. T. M. et al	2002	Scientia Forestalis
41	Barreiros, R. M. et al	2002	Scientia Forestalis
42	Keles, S. et al	2011	Scientia Forestalis
43	Martins, T. V. et al	2017	Scientia Forestalis
44	Ferrari, L.S. et al	2019	Scientia Forestalis

FONTE: A autora (2020)

Analisando a lista de publicações encontrada, é possível destacar que a utilização de métodos de otimização matemática na indústria florestal brasileira tem ocorrido há muitos anos, com pelo menos três artigos publicados entre os anos de 1976 e 1987. No entanto, houve um período de menor utilização de tais ferramentas, uma vez que nenhuma publicação pode ser encontrada no período que vai de 1988 a 1999. Ainda assim, a partir do ano de 2000 em diante surgiram vários estudos

FIGURA 2 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DO NÚMERO DE ARTIGOS QUE USAM DADOS REAIS E HIPOTÉTICOS EM SEUS ESTUDOS.



FONTE: A autora (2020)

As espécies florestais mais comumente representadas nos artigos avaliados foram aquelas que pertencem ao gênero *Eucalyptus* (em 69% dos artigos), seguido por aqueles que correspondem ao gênero *Pinus* (31% dos artigos). Além disso, a aplicação de técnicas de pesquisa operacional em florestas nativas representa 8% neste estudo, que envolveu manejo de floresta tropical e de Araucária.

Entre os níveis de planejamento, a maioria dos artigos analisados refere-se ao nível estratégico (54%), seguido do tático (35%) e operacional (12%). Na análise apenas um artigo combinou mais de uma escala temporal, embora a integração entre os diversos níveis apareça em outras pesquisas apesar da dificuldade (BELAVENUTTI *et al.*, 2018; BOUCHARD *et al.*, 2017).

Levando-se em conta a confirmação de que os métodos de otimização são aplicados com mais frequência em projetos florestais estratégicos, deve-se analisar qual modelo de planejamento utilizado para formular os problemas de acordo com a nomenclatura de Johnson e Scheurman (1977). Os resultados dessa pesquisa mostram que o Modelo I é mais comumente aplicado se comparado ao Modelo II, apesar de que em vários casos os autores não especificaram o modelo usado. Na verdade, apenas 19 artigos especificam se o Modelo I (84%) ou o Modelo II (16%) foi utilizado.

Quando se trata de técnicas de otimização usadas para resolver os problemas propostos, 61% dos estudos usam algoritmos clássicos, 32% deles usam metaheurística e 7% usam alguma técnica de análise de decisão multicritério (FIGURA 2b). No início, os estudos foram realizados exclusivamente sobre aspectos dos métodos clássicos, inserindo métodos heurísticos a partir do ano 2000, atingindo um pico de aplicação de tais técnicas no triênio que vai de 2012 até 2015. Os métodos de decisão multicritério, contudo, apesar de terem alguma notoriedade entre os anos de 200 e 2011 não têm sido aplicados nos últimos períodos.

Ao analisar as funções objetivo dos problemas abordados na literatura consultada, é possível observar que na maioria dos casos (63%), a otimização consistia em maximizar o valor presente líquido do empreendimento, que é a principal característica dos estudos na área do planejamento da produção florestal (FIGURA 2c). A minimização dos custos e a maximização da produção volumétrica têm recebido pouca atenção nas publicações. A categoria “outros” representa 21% dos estudos analisados, o que demonstra uma ampla variedade de problemas que têm sido abordados por pesquisadores usando diferentes técnicas de otimização.

Quanto às restrições impostas nos modelos de otimização, destaca-se a que é relacionada à produção volumétrica ao longo do tempo. Esta restrição está presente

em 49% dos artigos analisados aqui. De facto, tal restrição é clássica em modelos de planeamento da produção florestal, desde os estágios iniciais desta atividade.

4 DISCUSSÃO

O aumento do número de artigos publicados nos últimos anos mostra que existe uma tendência para o aumento de pesquisas na área. Isso pode ser justificado pelo aumento da acessibilidade aos recursos computacionais, que são essenciais para estudos deste tipo. Outros aspectos podem estar relacionados, como: o aumento da demanda gerada pela indústria florestal brasileira para estudos destinados a otimizar processos e reduzir custos da produção de madeira; a introdução de estudos sobre aplicações de inteligência artificial na indústria florestal, fazendo desta uma disciplina ensinada em vários cursos; fácil acesso a dados, com a melhora da coleta de dados; e, finalmente, a urgente necessidade por inovação que tem caracterizado a “quarta revolução industrial”, através da qual todo o processo atual está passando.

Depois de analisar criticamente os resultados, é possível estabelecer uma outra teoria para este aumento de publicações nos últimos anos. Hoje em dia, uma filosofia do “just in time” tem prevalecido onde as cadeias de abastecimento e os seus modelos de planejamento tem se tornado mais enxutos e mais rentáveis, ao contrário da filosofia “just in case” usada na época em que as condições de mercado eram favoráveis (NATARAJARATHINAM *et al.*, 2009). Além disso, entende-se que o crescimento da necessidade por produtos florestais, principalmente devido ao aumento da população, justifica a expansão do uso de tecnologias de otimização para satisfazer as exigências do mercado, o que requer maior produtividade, qualidade da madeira e menor custo de produção. Tais tecnologias permitem a análise e resolução de um problema, com base nas variáveis que têm grande influência na atividade florestal, ajudando na tomada de decisões.

Embora haja um aumento nas publicações, o pequeno número de autores responsáveis pela maioria das publicações revela que existe um pequeno número de cientistas dedicados ao estudo de ferramentas de otimização aplicadas no setor florestal brasileiro. Isso porque apesar de ter crescido o número de instituições que oferta disciplinas envolvendo pesquisa operacional, otimização e planejamento, aumentando o conhecimento sobre a temática, um pequeno número difunde essa ciência através da aplicação de programação e modelagem para resolução de problemas.

A maior ênfase nos termos “produção”, “manejo” e “planejamento” em comparação aos termos “regulação” e “transporte”, identificadas pela nuvem de palavras, podem estar associados com o fato de que nem todas as pesquisas conduzidas com planejamento florestal tem como objetivo a regulação da produção, como citado em Jhonson and Scheurman (1977). Isso salienta uma expansão do conceito para outras questões da indústria florestal, tais como o planejamento das operações florestais, incluindo a atividade de transporte de madeira.

No que diz respeito à base de dados utilizada, é possível inferir que os pesquisadores certamente gostariam de testar seus métodos em dados reais, mas devido à complexidade dos seus problemas de planejamento, estes muitas vezes recorrem a testar seus métodos em dados hipotéticos (RODRIGUES *et al.*, 2003, RODRIGUES *et al.*, 2004). Existem duas razões para tal: a dificuldade em se obter grandes bases de dados descrevendo panoramas reais e a inabilidade de se obter permissão para ilustrar os dados de uma organização em um trabalho de pesquisa publicado (SHAN *et al.*, 2009). No entanto, desde 2008 tem havido um aumento na aplicação de ferramentas de otimização em dados reais (FIGURA 2a) e isso pode ser uma tendência visto que as empresas têm aberto cada vez mais suas portas à pesquisa. Lembrando-se que os pesquisadores devem concordar em ocultar a origem dos dados, preservando a identidade das organizações.

Já se era esperado um maior número de trabalho aplicados à floresta de eucalipto, visto que, a possibilidade do uso da madeira do gênero *Eucalyptus* em uma infinidade de propósitos e características requeridas, levou grandes e pequenas empresas a estabelecer florestas com a espécie (GONÇALVES *et al.*, 2013). O eucalipto seguiu-se pelo gênero *Pinus*, que ainda predomina as florestas comerciais no sul do país. O uso de técnicas de pesquisa operacional em florestas nativas tem ganhado importância a nível nacional especialmente porque a Amazônia representa uma área significativa do país. Os artigos que aplicaram ferramentas de otimização em florestas nativas envolvem, em sua maioria, o manejo sustentável da Amazônia. Desenvolver um plano de gestão sustentável para florestas nativas não é uma tarefa simples, devido ao elevado número e distribuição irregular das espécies, além de estar sujeito à legislação ambiental. Dessa forma, existe a necessidade de se desenvolver

mais estudos aplicando técnicas de pesquisa operacional como uma ajuda ao planejamento da produção (FERNANDES *et al.*, 2013).

Observa-se que o planejamento estratégico é mais explorado nos estudos, uma vez que, na prática, desenvolver planos de manejo considerando um amplo horizonte de tempo é uma tarefa complexa, marcada pelo aumento de riscos e incertezas ligados à tomada de decisão (HOOGSTRA-KLEIN; BURGER, 2013). Assim, ferramentas computacionais se tornam importantes aliadas no processo de planejamento. Apesar dessa ampla disseminação no nível estratégico, pouco se encontra na literatura sobre trabalhos envolvendo o nível operacional. Esse fato pode ser classificado como um gap, já que o nível operacional é crucial para se alcançar as metas estabelecidas a nível tático e estratégico.

O fato do modelo tipo I ser mais comumente utilizado, pode estar atrelado ao fato de que, apesar do modelo tipo II exigir menor esforço computacional durante o processamento dos dados pelo menor número de variáveis de decisão, no momento da formulação das alternativas de manejo, as características do modelo tipo II podem implicar em modificações drásticas quando usada a programação inteira (RODRIGUES *et al.*, 2006).

Avaliando as técnicas de otimização utilizadas, como mostra a FIGURA 2b, é possível identificar um padrão a partir daí na utilização conjunta de técnicas clássicas e de heurística. Assim, as técnicas que antes eram aplicadas separadamente, agora têm sido aplicadas mutuamente na solução de problemas florestais (MENDONÇA *et al.*, 2008; ARCE *et al.*, 2004). Os tipos de métodos de otimização aplicados ao planejamento florestal são interessantes de várias perspectivas, incluindo: (a) alguns métodos são melhor compreendidos por profissionais do que outros; e (b) alguns métodos são melhores na abordagem de certos problemas do que outros, tanto na velocidade computacional quanto na perspectiva da complexidade computacional (SHAN *et al.*, 2009). Sabe-se que alguns artigos científicos descrevem o uso de mais de uma técnica de planejamento (ARCE *et al.*, 2004; COSTA *et al.*, 2013; FALCÃO e BORGES, 2003; MENDONÇA *et al.*, 2008), no entanto, a maioria descreve apenas um.

É bem conhecido que um dos inconvenientes dos métodos heurísticos é que não se pode provar que a solução encontrada é a melhor solução para o problema,

enquanto os métodos exatos promovem uma garantia da otimização. Contudo, à medida que a dimensão do problema aumenta, pode ser impossível resolver grandes problemas utilizando métodos analíticos rastreáveis. Por isso, o uso da metaheurística tem ganhado mais e mais espaço na solução de problemas na área florestal, como observado desde os anos 2000. Tal ferramenta tem a habilidade de gerar soluções bem próximas do ótimo em um período de tempo relativamente pequeno.

Apesar da maioria dos artigos envolver a maximização do retorno financeiro, desde 2000, é possível observar que as funções objetivo de muitos trabalhos foram classificadas na categoria “outras” (FIGURA 2c). Esta categoria engloba as funções objetivo envolvendo variáveis produtivas, ambientais e metodológicas. É importante salientar que uma função objetivo no caso da produção não está se referindo à sua maximização, que de fato tem caído em desuso para todas as indicações. Fiorentin *et al.* (2017), por exemplo, tiveram seu trabalho enquadrado na categoria produtiva e a função objetivo do problema deles era minimizar o desvio da produção entre um ano e o ano seguinte.

Ainda que Belavenutti *et al.* (2018) relatem que em certos anos o número significativo de trabalhos incluindo funções objetivo com caráter não produtivo, como a conservação da biodiversidade e proteção ambiental tem surgido, esta não é uma realidade brasileira. Apenas 2 estudos (4% do total) consideraram tais aspectos.

Embora os objetivos ambientais sejam incomuns de certa forma nos estudos brasileiros, em algumas ocasiões, autores brasileiros preferem introduzir recursos ambientais com restrições, ou indiretamente através das chamadas restrições espaciais. Artigos com esta inclusão surgiram após 2012 e dada a estrutura do modelo utilizado e a criatividade do planejador existem várias formas de reconhecer e acomodar as questões espaciais nos planos florestais. Outras funções de restrição que foram consideradas incluem aquelas relacionadas a restrições objetivo no caso dos métodos multi-objetivos (BRAZ *et al.*, 2004), subproduto por volume e por classes de diâmetro (CAMPOS *et al.*, 2013), taxa ideal de reforma para áreas pós corte (MARTINS *et al.*, 2017) e composição de máquinas e veículos de carga (MARTINS *et al.*, 2017). Além disso, a pesquisa operacional tem sido utilizada para dar suporte a outros aspectos da gestão, tais como minimização de erros nos ajustes de modelos para estimativas com medição indireta (BARRA *et al.*, 2011).

É importante mencionar que, em relação às técnicas propriamente ditas, este estudo não se preocupou com a forma com que os problemas estavam estruturados ou como os modelos foram construídos pois, em vista das várias maneiras nas quais os resultados da pesquisa são estruturados, estes aspectos são mais difíceis de serem compreendidos (SHAN *et al.*, 2009), e é por isso que uma explicação sobre as principais características dos diferentes métodos de otimização usados na amostragem pesquisada não foi incorporada. No entanto, as descrições dos métodos podem ser encontradas em outros estudos (EZQUERRO *et al.*, 2016; KANGAS *et al.*, 2014; YOSHIMOTO *et al.*, 2016).

Dessa forma, este trabalho, além de auxiliar e se apresentar como um recurso para acadêmicos, será fonte de pesquisa também para profissionais que procuram por melhores práticas e oportunidades na literatura acadêmica para o manejo de florestas levando-se em conta técnicas de otimização.

5 CONCLUSÃO

- Neste trabalho as aplicações da pesquisa operacional foram analisadas no Brasil e verificou-se o quanto essas técnicas têm ganhado importância no setor florestal. 93% dos 44 artigos avaliados foram publicados neste século, e o fato de que os pesquisadores estejam utilizando mais dados reais (87,5% nos últimos 6 anos) mostra uma maior interação entre o setor acadêmico e o setor privado. As empresas estão compreendendo cada vez mais os benefícios da otimização dos seus recursos.
- As exóticas estão sendo maiores alvos de pesquisas no Brasil, o que deixa evidente uma grande oportunidade na aplicação de ferramentas de pesquisa operacional nas florestas de manejo sustentável.
- Otimização no nível estratégico vem sendo amplamente utilizado, seguido do nível tático. Como perspectiva, o nível operacional poderia ter um maior foco para estudos futuros, uma vez que este nível é uma importante restrição para ganhos em longo prazo.
- Modelo tipo I é mais comumente utilizado que o Modelo tipo II.
- Quanto aos métodos, embora os clássicos sejam os escolhidos para resolver problemas florestais, a meta-heurística também ganha espaço quando se trata de grandes bases de dados, quando uma solução viável é suficiente para avaliar diferentes cenários em um curto período.
- Qualquer que seja o modelo, a ideia de programar a função objetivo para fins lucrativos ainda persiste, mas as restrições não produtivas têm ganhado espaço no ambiente da pesquisa, ainda que não tão operacional no setor privado. Aqui aponto a restrição espacial, que tem sido uma tendência principalmente devido à pressão que as empresas sofrem para se preocuparem com o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; BINOTI, D. H. B.; SOUZA, A. P.; SANTANA, A. F.; TORRE, C. M. M. E. A multi-agent system for forest transport activity planning. **Cerne**, Lavras, v.23, n. 3, p. 329-337, 2017.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; MENDES, J. B.; CABACINHA, C. D.; ASSIS, A. L.; MATOS, L. M. A.; LEITE, H. G. Metaheuristic clonal selection algorithm for optimization of forest planning. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 6, p. 1-10, 2017.
- ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 207-217, 2004.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. Implementing minimum area harvesting blocks in an optimized forest planning Model. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 1, p. 1-8, 2017.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, Lavras, v.21, n. 4. P. 649-656, 2015.
- BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F. MOREIRA, J. M. M. A. P.; SILVA, L. M. S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 85-95, 2010.
- BARRA, O. S. V.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A.; CORTE, A. P. D. Proposta Metodológica para o Ajuste ótimo da distribuição diamétrica sb de johnson. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n.1, p.151-156, 2011.
- BARREIROS, R. M.; GARCIA, J. N.; CAIXETA FILHO, J. V.; SANSIGOLO, C. A. Modelo de otimização para seleção de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 61, n. 1, p. 25-39, 2002.
- 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, 2018.
- BERGER, R.; ENGLER, J. J. C. Minimização do custo de transporte de madeira de eucalipto no estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 12, n. 1, p. 1-52, 1976.
- BETTINGER, P.; CHUNG, W. The key literature of, and trends in forest-level management planning in North America. **International Forestry Review**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 40-50, 2004.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M.; OLIVEIRA, M. L. R.; CAMPOS, J. C. C.; MONTE, M. A. regulation of even-aged forests with inclusion of environmental constraints. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 29-36, 2013.

BOUCHARD, M.; D'AMOURS, S.; RONNQVIST, M.; AZOUZI, R.; GUNN, E. Integrated optimization of strategic and tactical planning decisions in forestry. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 259, n. 1, p. 1132-1143, 2017.

BRAZ, E. M.; CARNIERI, C.; ARCE, J. E. Um modelo otimizado para organização dos compartimentos de exploração em floresta tropical. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 77-83, 2004.

CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S. Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando programação Inteira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 881-887, 2013.

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**, Amsterdam, v. 380, n. 1, p. 149-160, 2016.

COSTA, M. F.; FIEDLER, N. C.; MAURI, G. R. Clustering search e simulated annealing para resolução do problema de escalonamento de motoristas no transporte de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 299-305, 2013.

EZQUERRO, M.; PARDOS, M.; DIAZ-BALTEIRO. Operacional research techniques used for addressing biodiversity objectives into forest management: an overview. **Forests**, Basel, v. 7, n. 229, p. 1-18, 2016.

FALCÃO, A. O.; BORGES, J. G. Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal e problemas de grande dimensão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 63, n. 1, p. 94-102, 2003.

FERREZ, A. P. C.; CAMPOS, O. C.; MENDES, J. C. T.; STAPE, J. L. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 350, p. 40-45, 2015.

FERNANDES, A. P. D.; GUIMARAES, P. P.; BRAZ, E. M.; HOEFLICH, V. A.; ARCE, J. E. Alternativas de planejamento para a exploração florestal. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 339 – 350, 2013.

FIORENTIN, L. D.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L.; DAVID, H. C.; SILVA, P. H. B. M.; STANG, M. B.; FILHO, A. F. Strategies for regulating timber volume in forest Stands. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 116, p. 717-726, 2017.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. A.; SILVA, A. C. L. Comparação entre a Metaheurística Simulated Annealing e a Programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449-460, 2013.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J.E.; SILVA, A. C. L. Uso de algoritmo genético no planejamento florestal considerando seus operadores de seleção. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 460-467, 2009.

GOMIDE, L. R.; MELLO, J. M.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Automated selective thinning via multicriteria metaheuristic procedure. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 299-306, 2014.

GONÇALVES, J. C.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, S. P. C.; GOMIDE, L. R. Análise econômica da rotação florestal de povoamentos de eucalipto utilizando a simulação de Monte Carlo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1339-1347, 2017.

GONZÁLEZ, L. R.; GORGENS, E. B.; RODRIGUEZ, L. C. E. Avaliação econômica não-determinística pelo método de monte carlo de plantios de Eucalyptus spp., para a produção de celulose no sudoeste paulista. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 113, p. 31-38, 2017.

HOOGSTRA-KLEIN, M. A.; BURGER, M. Rational versus adaptive forest management planning: exploratory research on the strategic planning practices of dutch forest management organizations: exploratory research on the strategic planning practices of Dutch forest management organizations. **European Journal Of Forest Research**, [s.l.], v. 132, n. 5-6, p. 707-716, 2013.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Histórico do desempenho do setor**. Available at: < <http://iba.org/pt/biblioteca-iba/historico-dodesempenho-do-setor/>>. Accessed in: 10/09/2018.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives – discussion and synthesis. **Forest Science**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 1-31, 1977.

KANGAS, A.; NURMI, M.; RASINMAKI, J. From a strategic to a tactical management plan using a hierarchic optimization approach. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 29, n. 1; p. 154-165, 2014.

KELEZ, D.; BAZKENT, E. Z. A computer-bases optimization model for multiple use forest managment planning: a case study from Turkey. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 87-95, 2011.

LIMA, M. P.; CARVALHO, L. M. T.; MARTINHAGO, A. Z.; OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, S. P. C.; DUTRA, G. C.; OLIVEIRA, T. C. A. Methodology for planning log stacking using geotechnology and operations research. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 309-319, 2011.

MARQUES, G. M.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; FONTES, A. A. Aplicação da programação dinâmica na substituição de equipamentos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 749-756, 2005.

MARTINS, T. V.; GOMIDE, L. R.; FERRAZ FILHO, A. C.; SILVA, P. R.; MELO, L. A. mosaicos clonais de eucalyptus no planejamento florestal e seus efeitos econômicos e produtivos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 116, p. 727-737, 2017.

MELLO, A. A.; CARNIERI, C.; ARCE, J. E.; SANQUETTA, C. R. Planejamento florestal visando à maximização dos lucros e a manutenção do estoque de carbono. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 205-217, 2005.

MELLO, A. A.; CARNIERI, C.; ARCE, J. E.; SANQUETTA, C. R.; WEBER, K. S. Planejamento do suprimento de matéria-prima em uma indústria florestal utilizando programação em metas e considerando o estoque de carbono. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 4, p. 341-350, 2008.

MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F.; ARCE, J. E.; MAESTRI, R. Avaliação de um sistema para otimização do sortimento de Eucalyptus sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 247-258, 2008.

NASCIMENTO, F. A. F.; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MIRANDA, G. M. Uso da meta-heurística otimização por exame de partículas no planejamento florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 557-565, 2012.

NATARAJARATHINAM, M.; CAPAR, I.; NARAYANAN, A. Managing supply chains in times of crisis: a review of literature and insights. **Internacional Journal of Physical Distribution & Logistic Management**, [s.l.], v. 39, n. 7, p. 535-573, 2009.

OLIVEIRA, F.; VOLPI, N. M. P.; SANQUETTA, C. R. Aplicação de goal programming em um problema florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 89-98, 2002.

PAULA JUNIOR, G. G.; PEREIRA, A. R. Dimensionamento de uma frota de caminhões para transporte de carvão vegetal por meio da programação linear. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 21, n. 1, p. 85-95, 1980.

RODE, R.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SOUZA, A. L.; COSENZA, D. N.; BOECHAT, C. P. Applying classical forest regulation methods to smallholdings with cooperative constraints. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 2, p. 197-206, 2016.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L. Solução de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando busca tabu. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5. P. 701-713, 2003.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S. Metaheurística Simulated Annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p.247-256, 2004.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; SILVA, G. F. Metaheurística algoritmo genético para solução de problema de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 233-245, 2004.

RODRIGUES, F. L.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 769-778, 2006.

RODRIGUEZ, L. C. E.; LIMA, A. B. H. P. M. A Utilização da programação linear na determinação de uma estratégia ótima de reforma de um talhão florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 31, n. 1, p. 47-53, 1985.

SHAN, Y.; BETTINGER, P.; CIESZEWSKI, C. J.; LI, RONGXIA TIFFANY. Trends in spatial forest planning. **International Journal of Mathematical and Computational Forestry Resource Sciences**, Athens, v. 1, n. 2, p. 86-112, 2009.

SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L.; RODRIGUES, F. L.; SANTOS, H. N. Problemas com o uso de programação linear com posterior arredondamento da solução ótima, em regulação florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n.5, p. 677-688, 2003.

SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; SILVA, M. L. Influência de estimativas de produção de madeira em processos de regulação florestal utilizando programação linear. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 57-72, 2003.

SILVA, M. L.; SILVA, R. F.; LEITE, H. G. Aplicação da programação dinâmica na substituição de povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1063-1072, 2007.

SILVA, P. H. B. M.; ARCE, J. E.; LOCH, G. V.; DAVID, H. C.; FIORENTIN, L. D. Forest harvest scheduling plan integrated to the road network. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 69-76, 2016.

SOARES, T. S.; VALE, A. B.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 811-820, 2003.

SOUZA, R. A. T. M.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; CAIXETA FILHO, J. V. Eficiência e otimização do transporte principal de toras curtas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 62, n. 1, p. 130-146, 2002.

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, [s.l.], v. 123, n. 1-2, p. 233-245, 2015.

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P.; KONOSHIMA, M. Stand-level forest management planning approaches. **Current Forestry Reports**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 163-176, 2016.

I. Fellows, Package 'wordcloud', University of California Los Angeles, California, 2014. Available: <<https://cran.r-project.org/web/packages/wordcloud/wordcloud.pdf/>>.

CAPÍTULO II

APLICAÇÃO DE UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA EM UM PROBLEMA DE PLANEJAMENTO ANUAL DE COLHEITA FLORESTAL

RESUMO

Modelos de otimização utilizando técnicas de pesquisa operacional estão cada vez mais sendo aplicados no planejamento florestal. Contudo, essa ampla aplicação nos últimos anos vem focando no nível de planejamento estratégico, enquanto é incipiente no nível operacional. Nesse contexto, objetivou-se aplicar um modelo matemático para o planejamento do agendamento de frentes de colheita nas unidades produtivas a serem colhidas em um horizonte de planejamento de um ano. A área florestal considerada para o estudo tem 27.717ha e está localizada no extremo-sul do estado da Bahia, Nordeste do Brasil. Um modelo de programação linear inteira pura foi adaptado ao problema e solucionado utilizando-se o software Gurobi 8.1. A função objetivo do modelo buscou minimizar o deslocamento das frentes de colheita. Já as restrições envolviam a definição de um raio médio máximo de colheita e questões operacionais. Os cenários testados consideraram diferentes períodos para o microplanejamento da colheita e diferentes valores para a variação máxima da distância dos locais de colheita até a fábrica. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos de maneira não otimizada por uma equipe de engenheiros. O tempo gasto pelo modelo matemático para gerar um cenário ótimo foi equivalente a 3% do tempo total gasto pela equipe. Observou-se uma influência da suavização na dispersão das frentes colheita. O cenário com 40% de limite de suavização de raio e micro-horizonte de 1 dia, demonstrou uma redução de 600km no deslocamento, o que equivale a 14% do resultado encontrado pelo planejamento não otimizado forma tradicional.

Palavras-Chave: Planejamento Operacional. Manejo Florestal. Pesquisa Operacional.

CHAPTER II

APPLICATION OF AN OPERATIONAL RESEARCH MODEL IN AN ANNUAL PLANNING PROBLEM FOR FOREST HARVEST

ABSTRACT

Optimization models using operational research techniques are increasingly being applied in forest planning. However, this broad application in recent years has focused on the strategic planning level, while it is incipient at the operational level. In this context, the aim was to apply a mathematical model for planning the scheduling of harvesting fronts in the production units to be harvested in a planning horizon of one year. The forest area considered for the study is 27,717ha and is located in the extreme south of the state of Bahia, Northeast Brazil. A pure linear entire programming model was adapted to the problem and solved using Gurobi 8.1 software. The objective function of the model sought to minimize the displacement of harvest fronts. The restrictions involved the definition of a maximum average harvest radius and operational issues. The scenarios tested considered different periods for the microplanning of the harvest and different values for the maximum variation of the distance from the harvest sites to the mill. The results were compared with those obtained in a non-optimal way by a team of engineers. The time spent by the mathematical model to generate an optimal scenario was equivalent to 3% of the total time spent by the team. An influence of smoothing was observed in the dispersion of harvesting fronts. The scenario with 40% radius smoothing limit and 1 day micro-horizon, showed a reduction of 600km in displacement, which is equivalent to 14% of the result found by the planning not optimized traditional way.

Keywords: Operational Planning. Forest Management. Operational Research.

1 INTRODUÇÃO

No setor florestal, o Brasil é reconhecido mundialmente pela alta produtividade anual de suas áreas plantadas e pela menor rotação para corte final (IBÁ, 2017). Todavia, os custos setoriais têm feito com que a produção de madeira tenha se tornado mais cara nos últimos anos (FERRARI *et al.*, 2019). Com isso, a competitividade dos produtos florestais se torna um desafio, principalmente quando envolve dependência do mercado de exportação (RÖNNQVIST, 2003). Dessa forma, o conhecimento dos custos envolvidos em um processo produtivo assume um papel importante nas tomadas de decisão de determinado empreendimento (GRAÇA *et al.*, 2000) que objetive chegar a um sistema que ofereça maior vantagem técnica e econômica.

Em relação à produção de eucalipto, uma série de atividades deve ser considerada ao se analisar os custos de produção, que vai desde a formação da floresta até a entrega do produto no destino final. Santos *et al.* (2019) afirmam que a colheita e o transporte florestal compõem a maior parcela dos custos de produção da madeira. Ou seja, juntamente ao transporte, os aspectos operacionais da colheita florestal está entre os principais fatores que motivam a lucratividade e a sustentabilidade do manejo florestal (AUGUSTYNCZIK *et al.*, 2016).

Os custos de colheita são aqueles relacionados com as operações de abate, descascamento, traçamento, extração e empilhamento da madeira nos limites dos polígonos florestais ou pátio intermediário, além da alocação das frentes de trabalho nas áreas produtivas. Esse deslocamento entre as áreas a serem colhidas afeta diretamente a eficiência operacional (relação da capacidade horária total de produção das máquinas pelo tempo em que esteve efetivamente disponível) das operações de colheita e conseqüentemente nos custos da operação. As atividades de colheita exigem um planejamento adequado e cuidadoso, a fim de alocar da melhor maneira as máquinas em campo e cumprir as metas de manejo florestal de forma eficiente. É por isso que uma das principais fases do planejamento da produção florestal se refere ao agendamento da colheita, já que envolve uma alta representatividade no custo final

do produto e torna possível a otimização das operações (AUGUSTYNCZIK *et al.*, 2015).

Como um processo de tomada de decisão, o planejamento exerce fundamental importância para a sustentabilidade dos empreendimentos florestais, tendo em vista a redução das incertezas (BANHARA, 2010). Geralmente, os planos são feitos em diferentes escalas, tais como estratégico, tático e operacional, à medida que se tornam mais específicos e com menor horizonte temporal de execução (MCDILL, 2014). O planejamento estratégico se refere à sustentabilidade do empreendimento florestal e norteia os demais planos de abastecimento de médio e curto prazos (WERNEBURG, 2015; BINOTI, 2010). O planejamento tático envolve às questões pertinentes às práticas de manejo nos compartimentos da floresta para atingir as metas obtidas a partir do modelo estratégico (MCDILL, 2014). E, finalmente, o planejamento operacional engloba informações detalhadas de curto prazo e envolvendo realidade de campo. Rönnqvist (2003) destaca a importância do planejamento operacional, visto a ascensão de formas de acesso à informação e demanda de análises cada vez mais detalhadas para tomadas de decisão.

Na literatura, uma considerável parcela dos trabalhos científicos focados no planejamento florestal envolve os problemas de nível tático e estratégico (SILVA *et al.*, 2016; FIORENTIN *et al.*, 2017). O nível operacional tem sido raramente foco de estudo pela academia. Santos *et al.* (2019) associam essa lacuna ao fato de que os problemas à nível operacional são substancialmente mais complexos do que problemas pertencentes aos outros níveis hierárquicos.

Dessa forma, fica evidente que, apesar de ser comum encontrar literatura específica com aplicação de ferramentas de otimização para o planejamento estratégico e tático, o de curto prazo é trabalhado muito mais com planos viáveis de acordo com cada situação de campo do que de forma pragmática por modelos matemáticos. Porém, esse gap pode estar permitindo perdas de oportunidade tanto de ganhos quanto de desembolsos evitados. É nesse cenário que se torna necessária a aplicação de ferramentas de Pesquisa Operacional para solução de problemas de nível operacional, em virtude da grande complexidade dos modelos que envolvem esse tipo de problema.

Assim, dada a importância de se desenvolver pesquisas relacionadas à aplicação de ferramentas de pesquisa operacional em problemas de nível operacional, além da representatividade de um planejamento bem construído no processo de produção de madeira e sustentabilidade do empreendimento florestal, o presente trabalho teve como propósito aplicar um modelo matemático para planejamento do agendamento das frentes de colheita nas unidades produtivas a serem colhidas em um horizonte de planejamento de um ano.

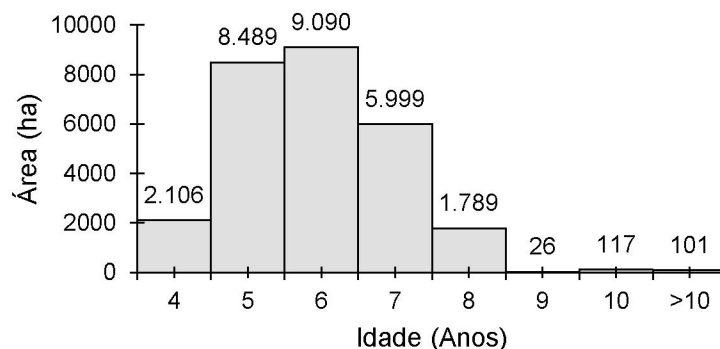
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido com dados de *Eucalyptus sp.* de uma empresa de celulose localizada no extremo sul da Bahia, que destina a matéria-prima ao abastecimento de sua fábrica. Buscou-se solucionar um problema de planejamento operacional da colheita para atender a demanda anual de madeira para o processo fabril de celulose.

O volume total de madeira disponível para colheita foi de 4.111.207 m³, distribuído em uma área total de 27.717ha. Tal área é subdividida em 431 unidades de produção, com idade entre 4 e 16 anos (FIGURA 1) e uma idade média ponderada pelo volume de madeira igual a 6,2 anos.

FIGURA 1 – Distribuição da área de estudo, um povoamento de *Eucalyptus sp.*, por idade.



FONTE: A autora (2020)

Além da idade e área de cada unidade de produção, a base de dados contempla informações dos módulos referentes à quantidade de máquinas e produtividade média (QUADRO 1), além de informações cadastrais das unidades, como volume de inventário pré-corte e distância da unidade de produção à fábrica. A matriz de distâncias entre as unidades de produção considerou o centro geométrico de cada polígono como o ponto de referência.

QUADRO 1 – Informações de número de máquinas e produção diária de cada módulo.

Frente de colheita	Quantidade de máquinas disponíveis	Produtividade média diária (m³/dia)
A	11	2.931,5
B	12	3.198,0
C	12	3.198,0
D	12	3.198,0

FONTE: A autora (2020)

2.2 PLANEJAMENTO E MODELO ATUAL DO AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL

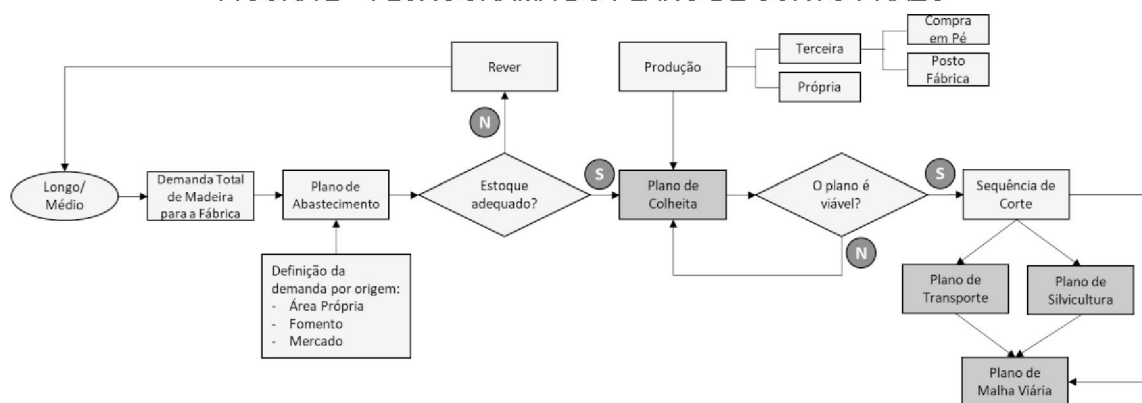
A geração de um plano de corte para a produção futura de madeira exige que sejam simulados cenários que consideram diversas variações que podem ocorrer tanto na floresta quanto no âmbito econômico, ambiental e social. O planejamento estratégico é feito a longo prazo variando de 12 a 30 anos e visa garantir a sustentabilidade no fornecimento da matéria-prima para o processo. Para tanto, é o norteador dos demais planos de abastecimento do médio e curto prazo.

Para o planejamento tático, ou de médio prazo, o horizonte de planejamento pode variar entre 3 e 7 anos e objetiva determinar as unidades produtivas a serem colhidos nesse período para atender a demanda de consumo da fábrica. Nessa fase também são incluídas restrições ambientais, sociais e de infraestrutura.

Com o planejamento tático elaborado é realizado o planejamento operacional, ou de curto prazo, que consiste no sequenciamento mensal das unidades produtivas determinadas pelo médio prazo e geralmente englobam um horizonte de planejamento de 12 a 18 meses. Antes do agendamento em si são considerados aspectos não abordados nos níveis anteriores, que atuam antes, durante e depois da atividade propriamente dita, tais como possíveis demandas adicionais da fábrica no período, regulação do estoque de madeira disponível para transporte, raio médio mensal de atuação da colheita em relação à fábrica, atrasos de licenciamento, chuvas acima da previsão e ocorrências de incêndios e ventos que acarretam necessidade de limpeza técnica. Dessa forma, terão unidades produtivas que não foram indicados no médio prazo que serão acrescentadas na sequência de corte para possibilitar a operacionalização do corte no ano em questão.

Na FIGURA 2, o fluxograma do plano operacional apresenta as fases de conexão entre o longo/médio e o curto prazo. É importante ressaltar que o momento das revisões do plano de colheita conta com a participação de todos os envolvidos na elaboração e principalmente na execução do plano, como operação de colheita, logística, silvicultura e malha viária para se tenha um plano bem estruturado com grandes possibilidades de êxito na execução.

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DO PLANO DE CURTO PRAZO



FONTE: A autora (2020)

Os parâmetros considerados para o dimensionamento da produção mecanizada de colheita no planejamento operacional são:

- Quantidade de máquinas disponíveis (unid).
- Produtividade (m^3/h).
- Horas disponíveis por dia (h).
- Disponibilidade Mecânica (%).
- Eficiência Operacional (%).
- Dias trabalhados no mês (dias).

A eficiência da operação é ditada pelo ambiente de atuação da colheita como clima, características do terreno e da floresta, mas também pelo deslocamento das máquinas entre as unidades produtivas. Dessa forma, planejar corretamente o agendamento das áreas a serem colhidas reduz o tempo que as máquinas ficam paradas e conseqüentemente aumenta a eficiência operacional da atividade.

Com a base do plano de colheita definida, uma equipe multidisciplinar de microplanejamento recorre ao sistema de informação geográfica para elaboração de

mapas com a espacialização dos talhões. Definido o ponto inicial de cada frente de trabalho de colheita, é iniciado o sequenciamento manualmente buscando-se da melhor forma possível otimizar a movimentação. Dessa maneira tradicional, o plano é refinado durante, no mínimo, 3 dias para uma primeira visão do sequenciamento anual com uma equipe de planejamento e de campo trabalhando juntos, uma média de 2 pessoas.

2.3 MODELO PROPOSTO PARA AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL

Como o principal objetivo do agendamento é a alocação sequencial das máquinas em cada unidade produtiva, as variáveis de decisão do modelo poderiam assumir uma natureza binária. Isso possibilitou que fosse optado, nesse trabalho, utilizar um modelo de PILP (*Pure Integer Linear Program*), adaptado do estudo de Santos *et al.* (2019), principalmente pelo fato do modelo poder ser solucionado por *solvers* comerciais (uma questão de aplicabilidade).

A função objetivo (1) visa minimizar a distância total percorrida por todos os módulos durante o horizonte de planejamento.

$$\text{Min} \sum_{f \in F} \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} \sum_{\delta \in H} \rho_{ij} X_{fij\delta} \quad (1)$$

Onde: $f \in F$: representa um módulo de colheita (frente de trabalho); $i \in T$: representa uma unidade produtiva, assim como $j \in T$; $\delta \in H$: representa um dia no horizonte de planejamento, como um dia candidato para o módulo iniciar a colheita em uma determinada unidade; ρ_{ij} : é a distância entre as unidades i e j (em km); e, por fim, a variável $X_{fij\delta}$: assumirá o valor 1 se o módulo f vai da unidade i para a j no dia δ , que pertence ao conjunto H e representa um dia de colheita, e o valor 0 no caso das demais combinações da matriz.

A expressão (2) garante que cada unidade produtiva será colhida uma única vez ao longo do horizonte de planejamento.

$$\sum_{f \in F} \sum_{\delta \in H} y_{fi\delta} \leq 1 \quad i \in T \quad (2)$$

Onde: $y_{fi\delta}$ assume valor 1 caso o módulo f inicie a colheita na unidade i no dia δ e valor 0, caso não.

A expressão (3) evita que o módulo f opere em mais de uma unidade produtiva no mesmo dia ao longo do horizonte de planejamento.

$$\sum_{i \in T} x_{fid} \leq 1 \quad f \in F, 1 \leq d \leq \delta_{max} \quad (3)$$

Onde a variável x_{fid} assume valor 1 caso o módulo f esteja colhendo a unidade i no dia d (representa um dia de colheita, no qual um módulo está colhendo uma unidade produtiva) e valor 0, caso contrário, presumindo-se que d deve ser maior ou igual à 1 e menor que δ_{max} que representa o último dia do horizonte de planejamento que o módulo f pode começar a efetuar a colheita da unidade produtiva e é definido por: $\delta_{max} = \max\{\tau_{if}\}$, onde τ_{if} representa a quantidade de dias necessária para colheita da unidade i pelo módulo f .

A expressão (4) assegura que cada unidade seja colhida por apenas um módulo, ou seja, duas frentes não operam simultaneamente na mesma unidade produtiva.

$$\sum_{f \in F} x_{fid} \leq 1 \quad t \in T, 1 \leq d \leq \delta_{max} \quad (4)$$

A expressão (5) garante que cada módulo opere em cada período do horizonte de planejamento.

$$\sum_{i \in T} x_{fid} = 1 \quad f \in F, d \in H \quad (5)$$

A expressão (6) estabelece o tempo de operação disponível.

$$\sum_{i \in T} \sum_{\delta \in H} \tau_{if} y_{fi\delta} \leq \delta_{max} \quad f \in F \quad (6)$$

As expressões (7)-(9) garantem que uma vez que um módulo inicia a colheita de uma unidade, este módulo completará a colheita dela.

$$\sum_{d=1}^{\delta_{max}} x_{fid} \leq \tau_{if} \quad t \in T, f \in F \quad (7)$$

$$\sum_{d=\delta}^{\delta+\tau_{if}-1} x_{fid} \geq \tau_{if} y_{fi\delta} \quad t \in T, f \in F, \delta \in H \quad (8)$$

$$x_{fid} \geq y_{fi\delta} \quad f \in F, t \in T, \delta \in H, \delta \leq d \leq \delta + \tau_{if} - 1 \quad (9)$$

A expressão (10) indica se um módulo vai da unidade i para a j em um dado período.

$$X_{fij\delta} \geq x_{fj\delta} + x_{fi(\delta-1)} - 1 \quad f \in F, i \in T, j \in T, \delta \in H \quad (10)$$

A expressão (11) assegura que o módulo f chegue na unidade j no período δ apenas se o módulo iniciar a colheita de j neste período.

$$X_{fij\delta} \leq y_{fj\delta} \quad f \in F, i \in T, j \in T, \delta \in H \quad (11)$$

A expressão (12) garante que o módulo f só pode colher uma unidade i se o módulo iniciou a colheita nos períodos passados ou no período atual.

$$x_{fid} \leq \sum_{\delta=d-\tau_{if}+1}^d y_{fi\delta} \quad f \in F, t \in T, d \in H, d \geq \tau_{if} \quad (12)$$

A expressão (13) suaviza as distâncias entre as unidades sendo colhidas e a fábrica (destino final do produto).

$$(1 - \alpha)R \leq \sum_{f \in F} \sum_{i \in T} \pi_i x_{fid} \leq (1 + \alpha)R \quad d \in H \quad (13)$$

Onde α representa um coeficiente de suavização de raio médio; R é o raio em km de todos os módulos até a fábrica; e π_i é a distância em km da unidade i até a fábrica.

As expressões (14)-(16) definem o domínio das variáveis de decisão.

$$y_{fi\delta} \in \{0; 1\} \quad f \in F, t \in T, \delta \in H \quad (14)$$

$$x_{fid} \in \{0; 1\} \quad f \in F, t \in T, d \in H \cup \{0\} \quad (15)$$

$$X_{fij\delta} \in \{0; 1\} \quad f \in F, i \in T, j \in T, d \in H \quad (16)$$

A expressão (17) é adicionada na primeira otimização e é necessária para definir em qual unidade cada módulo irá iniciar a colheita no início do planejamento, onde i indica a unidade inicial da frente f .

$$y_{fi\delta} = 1 \quad f \in F \quad (17)$$

O modelo matemático descrito acima, foi empregado sequencialmente até que todas as unidades produtivas sejam colhidas. Inicialmente, foi definido o tamanho do horizonte de planejamento H , por exemplo, $H = \{1; 2; \dots; 6\}$. Esta estratégia de fracionar o horizonte de planejamento em micro-períodos (ou micro-horizontes) se deu devido à complexidade computacional de resolver o problema completo, gerando um modelo mais reduzido para cada micro-período, limitado a duas horas de otimização cada. Com o H definido, foi gerado o modelo e executado. Após a otimização, foram identificadas todas as unidades produtivas já colhidas e removidas da lista das que ainda precisavam ser colhidas. O modelo era gerado novamente, desconsiderando as unidades colhidas, e otimizado. Este processo era executado até que não houvesse mais unidades produtivas a serem colhidas.

Foram definidas diferentes abordagens envolvendo H (horizonte de planejamento) e α (coeficiente de suavização do raio médio) para as simulações de resultado da função objetivo (QUADRO 2).

QUADRO 2 – Cenários testados para a análise, onde H é o tamanho do micro-horizonte de planejamento e α refere-se à suavização do raio médio entre a colheita e a fábrica.

Cenário	H (dias)	α (%)
1	1	-
2	1	20
3	1	40
4	1	60
5	2	-
6	2	20
7	2	40
8	2	60

FONTE: A autora (2020)

Para os cenários 1 e 5, que não havia limitação quanto ao raio médio de atuação de colheita e a fábrica, foi necessário remover a restrição (13) do modelo.

Os algoritmos foram codificados em C++ e executados em uma interface Intel® e Xeon® no sistema CentOS Linux com processadores de 2,6GHz e 16GB de memória RAM. Todos os cenários foram solucionados pelo Gurobi 8.1.0.

2.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para análise dos resultados do modelo proposto, os valores da função objetivo de cada um dos cenários foi comparado com o deslocamento total dos módulos obtido no planejamento feito de forma tradicional descrito no tópico 2.2, que vai ser denominado nesse trabalho como cenário testemunha. Além do resultado da função objetivo, é importante também analisar o tempo que cada estratégia levou para construção do plano de colheita.

Em relação à variação de α , como a base de dados compõe um mesmo número finito de unidades de produção, sem a distribuição da colheita ao longo dos meses não haveria diferença de raio em km entre os cenários testados. Com a quantidade de dias necessários em cada cenário para finalizar a colheita, é possível “mensalizar” as atividades. Esse cálculo permite que a colheita de cada módulo consiga ser analisada por unidade temporal. No caso deste trabalho, o calendário operacional da atividade de colheita foi utilizado para levantar o que seria colhido em cada mês por cada módulo em cada cenário. Dessa forma, obtém-se um raio médio para cada cenário ao longo dos meses do ano. Assim como os demais parâmetros de avaliação, o raio será comparado com o cenário testemunha que apresenta um raio médio de 65,09 km, com um máximo de 88,04 km e mínimo de 53,61km.

3 RESULTADOS

Enquanto de forma tradicional, foram necessárias 72 horas para obtenção de resultados, o modelo apresentou em um menor período de tempo (TABELA 1), sendo que cada “sub-modelo” foi otimizado por duas horas.

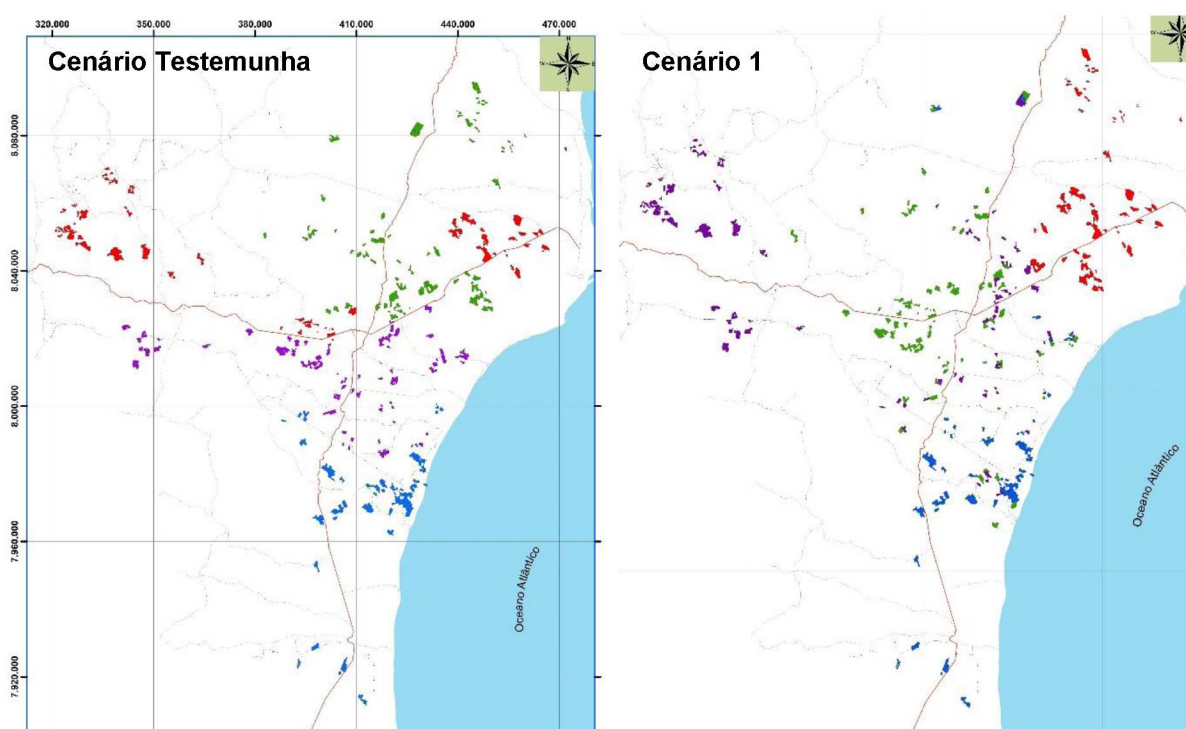
TABELA 1 – Tempo em horas para obtenção de resultados por parte dos cenários testados.

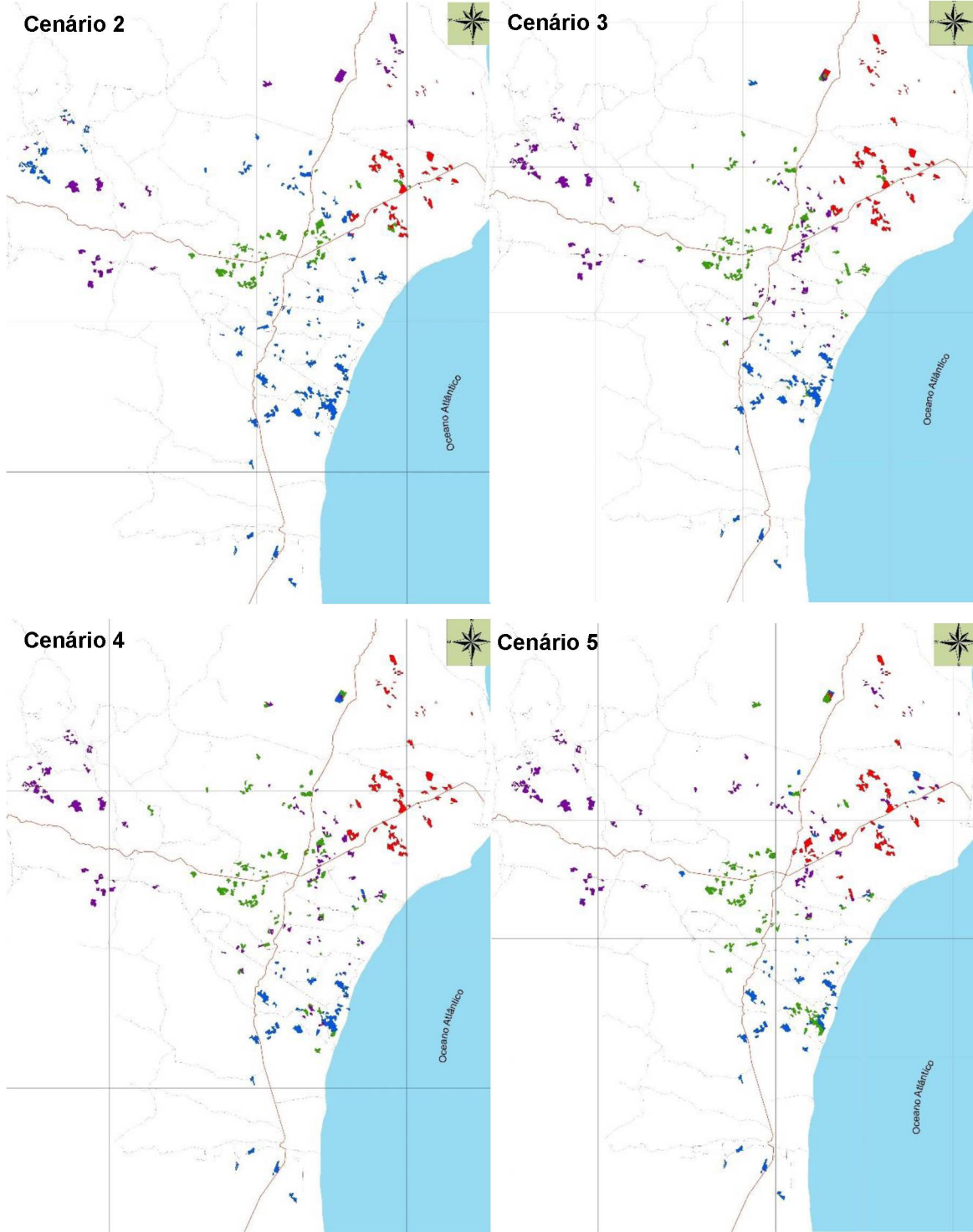
Cenário	Tempo (s)
1	4.345,6
2	3.069,0
3	4.851,7
4	4.258,9
5	19.658,7
6	15.244,1
7	22.080,6
8	20.468,0

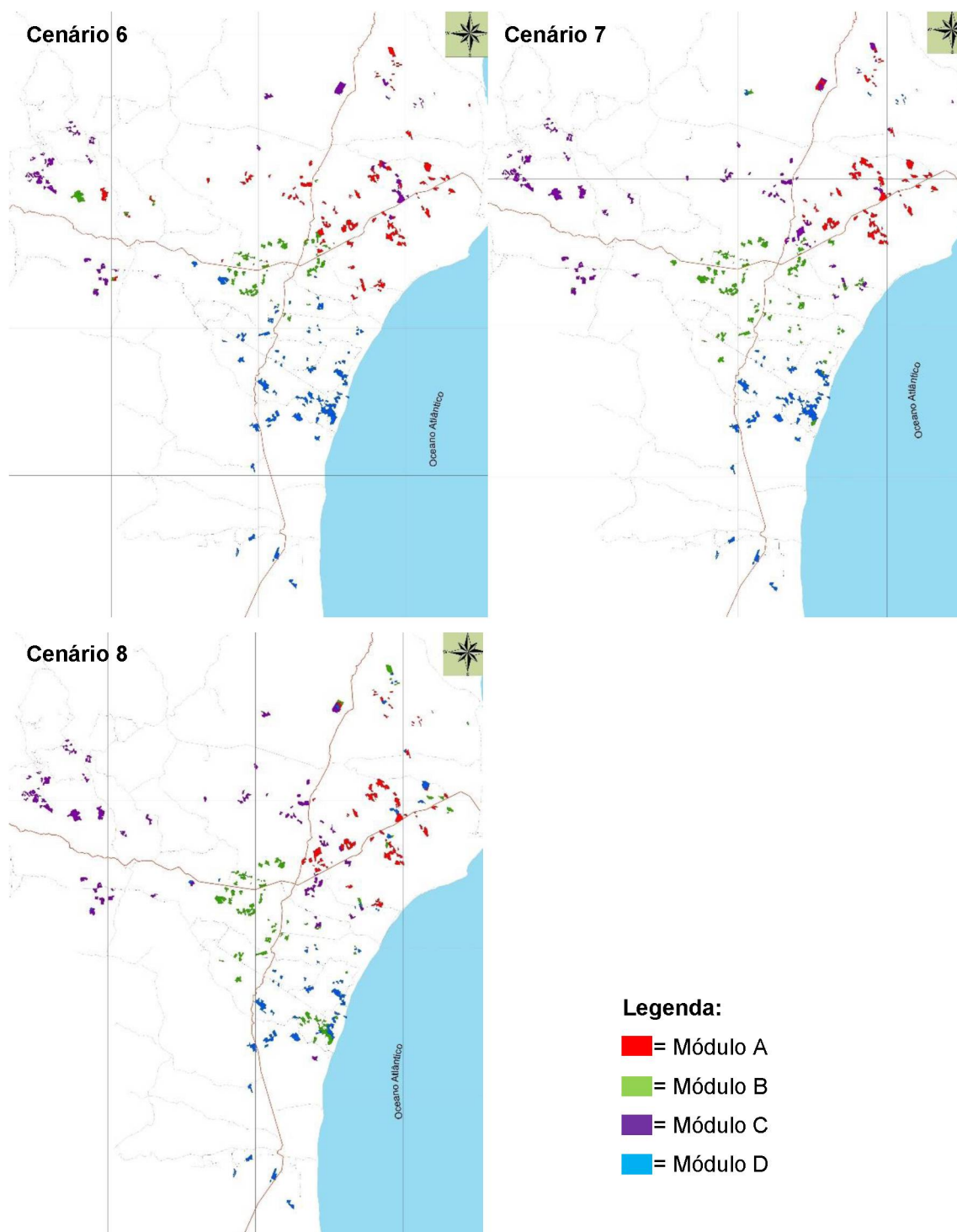
FONTE: A autora (2020)

O modelo se comportou de forma diferenciada em relação à alocação dos módulos nas áreas de colheita à medida que o α varia (FIGURA 3).

FIGURA 3 – Agendamento espacial da colheita de *Eucalyptus sp.* por frente de trabalho







FONTE: A autora (2020)

Ainda em relação à alocação dos módulos de colheita, percebe-se que houve uma variação de volume colhido por módulo em cada cenário (TABELA 1).

TABELA 2 – Volume colhido por módulo por cenário em m³, sabendo-se que o volume total de cada cenário é de 4.111.207 m³, pois a base de unidades produtivas é a mesma para todos eles.

Módulo	T	1	2	3	4	5	6	7	8
A	925.894	982.540	720.297	993.929	982.540	1.011.196	1.436.825	993.233	1.015.333
B	1.073.239	1.061.669	670.342	1.048.047	1.061.669	1.047.731	588.429	1.026.813	1.028.664
C	1.033.260	1.007.602	580.710	990.946	1.001.647	1.001.410	626.698	1.006.470	1.028.336
D	1.078.815	1.059.396	2.139.858	1.078.286	1.065.351	1.050.871	1.459.255	1.084.691	1.038.873

FONTE: A autora (2020)

O resultado de volume colhido por módulo em cada cenário (TABELA 1) influencia diretamente no tempo de atuação da colheita das unidades produtivas disponíveis para colheita (TABELA 2).

TABELA 3 – Quantidade de dias necessário pelo cenário testemunha e pelos cenários do modelo para finalização da colheita das unidades produtivas.

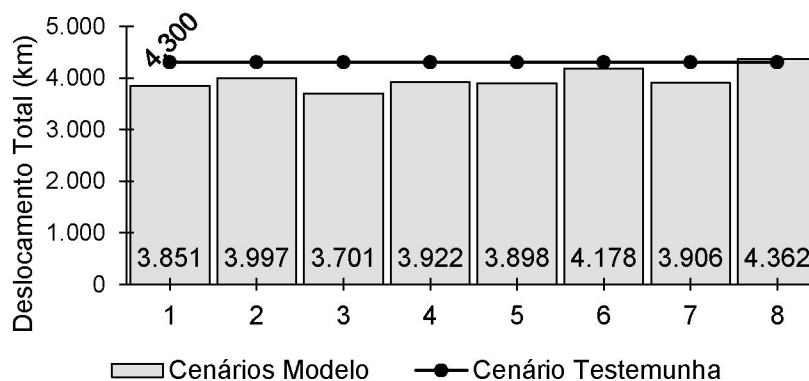
Módulo	T	1	2	3	4	5	6	7	8
A	318,62	336,43	246,74	340,33	336,44	346,12	493,12	340,42	347,89
B	337,95	334,37	210,62	329,96	334,37	329,26	185,24	323,29	323,78
C	325,31	317,86	183,39	312,46	315,90	315,60	197,90	317,28	324,10
D	338,95	332,84	673,61	338,77	334,95	331,44	458,84	340,94	327,74

FONTE: A autora (2020)

Pelos resultados de volume colhido e dias de atuação da colheita, nota-se uma disparidade nos cenários 2 e 6, que apresentaram infactibilidade e não podem ser considerados soluções operacionalmente viáveis, já que, por exemplo, apresentaram módulos colhendo por mais de dois anos.

Com exceção do cenário 8, houve uma redução da distância percorrida em todos os cenários avaliados (GRÁFICO 1). Em especial, destaca-se o cenário 3, que apresentou uma redução de 14% do deslocamento quando comparado ao cenário testemunha, com uma diferença de 600km.

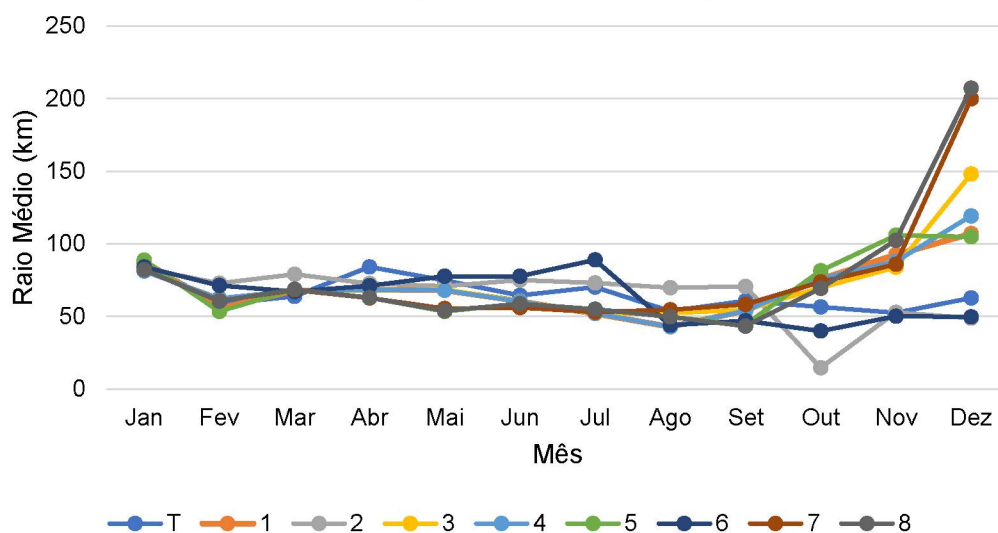
GRÁFICO 1 – Deslocamento total em km por cenário testado em relação ao cenário testemunha.



FONTE: A autora (2020)

Observando-se o raio médio de atuação da colheita ao longo do horizonte de planejamento, é possível notar que, com exceção dos cenários 2 e 6 que foram expurgados pela infactibilidade na solução do problema., houve um aumento do raio nos últimos meses de colheita (GRÁFICO 2).

GRÁFICO 2 - Raio médio dos módulos em relação à fábrica e a variação entre cada cenário testado do modelo ao longo do horizonte de planejamento



FONTE: A autora (2020)

4 DISCUSSÃO

O uso de ferramentas de pesquisa operacional é de crucial importância para resolução e obtenção de soluções para problemas práticos no contexto empresarial e há uma crescente evolução das técnicas já desenvolvidas, com resultados cada vez mais acurados (ARAÚJO *et al.*, 2018). Mas essa evolução deve acontecer nos diferentes níveis de planejamento, estratégico, tático e operacional, uma vez que o princípio do planejamento é a ligação entre todos os níveis organizacionais, de forma que estejam direcionando esforços para os mesmos objetivos. Nesse contexto, o planejamento estratégico não é autossuficiente. Sem o seu desdobramento não existem ações para geri-lo e operacionalizá-lo (FERREIRA; DIEHL, 2012). Deixando claro que o planejamento operacional é a etapa onde questões mais operacionais são detalhadas, é extremamente vantajoso fazer uso de ferramentas matemáticas para solução de problemas dessa natureza, tratando o planejamento como um ciclo, onde todos os níveis foram solucionados com recursos cada vez mais precisos e ágeis.

O tempo máximo para que o solver resolvesse o problema proposto é equivalente a 3% do tempo de construção do plano de forma tradicional. Ou seja, 97% do tempo de planejamento, poderia ser destinado a análises e refinamentos. O ganho em tempo é crucial, dado que as empresas estão cada vez mais ligadas a análises mais detalhadas para as tomadas de decisão para gerenciamento do empreendimento. A combinação entre a otimização do sequenciamento e o maior tempo de análise traz ganhos ainda maiores quando levado em consideração que sequência de corte deve ser feita de forma cautelosa, pois o não cumprimento da mesma desencadeia uma série de impactos que comprometem o orçamento previsto, como alteração de silvicultura, mudança de frente de colheita, alteração dos custos e outros.

Além disso, é válido salientar que esse processo de agendamento da colheita não é feito apenas uma vez no período de planejamento anual. São diversos cenários com diferentes demandas. Ter ferramentas dinâmicas que simulem esses diferentes cenários de forma mais ágil e otimizada gera ainda mais ganhos em análise e na qualidade da entrega, além de permitir que o gestor florestal tenha condições de analisar diferentes possibilidades para o planejamento (ARAÚJO JÚNIOR *et al.*, 2017).

Pela FIGURA 3, pode ser observado que o modelo se comportou de forma diferenciada à medida que o H e o α variavam. Apesar do volume total ser o mesmo em todos os cenários, houve variação significativa entre os módulos (TABELA 2), assim como nos dias de atuação de cada módulo em cada cenário (TABELA 3). Isto é nítido nos cenários com maior restrição de raio, cenários 2 e 6, pois tiveram que combinar a função objetivo de reduzir deslocamento ao passo que suavizavam a oscilação de raio médio como restrição. Essa combinação causou uma infactibilidade na solução e, nesse caso, o modelo alocou a unidade produtiva da sequência no módulo mais próximo e as demais seguiram essa sequência no mesmo módulo. Como alternativa para que o modelo não gere esse tipo de infactibilidade, poderia ter sido desenvolvida uma heurística que considerasse o raio como uma variável flexível à medida que o modelo fosse executado.

Quanto aos diferentes micro-horizontes testados, a tendência de cenários com um número maior de períodos é levar a soluções melhores, uma vez que consideram mais períodos simultaneamente. Porém, o tempo máximo de execução estipulado como limitante para os modelos foi insuficiente para obter uma solução aceitável. Enquanto os cenários com $H = 1$ processaram os dados em uma média de 1,1h, os cenários com $H = 2$ precisaram de, em média, 5,4h (TABELA 1). Se o tempo de processamento estabelecido fosse maior, $H = 2$ provavelmente resultaria em soluções melhores do que os cenários com $H = 1$. Entretanto, o tempo é um importante requisito para a celeridade do processo de planejamento e os cenários com $H = 1$ trouxeram ganhos significativos na redução da função objetivo.

O cenário que apresentou a maior redução no deslocamento total dos módulos da colheita florestal foi o 3, que consistia no $H = 1$ e $\alpha = 30\%$, com um impacto de 600km. Esse tipo de estratégia de minimizar distância percorrida, possibilita aumentar a eficiência das operações e reduzir os impactos ambientais da atividade, pois diminuem a movimentação das máquinas entre os módulos de colheita, minimizam o tempo improdutivo de realocação dos veículos e reduzem os custos relacionados à manutenção e construção de estradas (SILVA *et al.*, 2016).

A restrição de raio foi projetada para suavizar o raio médio entre a menor medida de tempo que o modelo considerou, ou seja, dias. Em ordem prática, nas empresas essa variável é analisada entre meses. Por isso, pela produtividade e

calendário operacional, foi possível “mensalizar” o sequenciamento do plano de colheita (GRÁFICO 2). É possível notar que, expurgando o efeito nos cenários 2 e 6, todos os demais cenários apresentaram aumento nos últimos meses de atuação no ano. Isso se deve pelo fato de, pela estratégia adotada, o modelo dispõe de muitas opções para colher no início do horizonte de um ano e à medida que o tempo evolui estas possibilidades vão se esgotando. O recomendado seria trabalhar com uma visão maior para que pudesse ser descartada uma porção não aderente do final do planejamento.

De forma tradicional, o raio médio não é considerado a princípio. O plano é construído considerando-se as premissas de colheita e ao finalizar, é avaliado se o mesmo se enquadra nas premissas de suavização de raio. Caso o retorno seja negativo, o plano deve ser refeito. Então, desenvolver uma restrição no modelo que considera essa variável desde o início é de extrema relevância para um planejamento integrado e que atenda todas as vertentes do processo.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo que pudesse ser de fácil aplicação por solucionadores comerciais, por isso a escolha do PILP. Porém isso pode levar à um modelo maior devido à criação de variáveis auxiliares. Apesar disso, problemas binários de PILP são notavelmente mais fáceis de solucionar. Santos *et al.* (2019) dão como alternativa as heurísticas e citam trabalhos que as incorporam à um solucionador comercial para lidar com esse tipo de problema. Ou seja, levando em consideração o grande número de restrições e variáveis binárias geradas quando o planejamento envolve um grande número de talhões ou blocos, métodos de solução heurística podem ser requeridos. Essas abordagens podem ser aplicadas para obter soluções razoáveis em um tempo de processamento mais curto e merecem uma investigação mais aprofundada.

5 CONCLUSÃO

- A comparação dos resultados gerados pelo modelo nos diferentes cenários com o plano construído de forma tradicional mostrou a possibilidade de melhora na qualidade das soluções ao fazer uso das técnicas de pesquisa operacional.
- O modelo foi capaz de fornecer resultados factíveis em 3% do tempo em que a empresa consegue da forma tradicional, ganhando tempo em análise e refinamentos.
- O cenário 3 foi capaz de reduzir em 14% o deslocamento em relação ao cenário testemunha. Portanto, o modelo desenvolvido pode ser aplicado a fim de alocar os módulos nas unidades produtivas minimizando o deslocamento.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. M.; ARAÚJO, D. O.; PASSOS, F. G. Análises das vantagens do uso da pesquisa operacional em problemas de corte: uma revisão sistemática da literatura, **Produção em Foco**, Joinville, v.08, n.2, p. 326-345, 2018.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; BINOTI, D. H. B.; SOUZA, A. P.; SANTANA, A. F.; TORRE, C. M. M. E. A multi-agent system for forest transport activity planning. **Cerne**, Lavras, v.23, n. 3, p. 329-337, 2017.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; da SILVA, A. C. L. Planejamento Espacial da Colheita Considerando Áreas Máximas Operacionais. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 649-656, 2015.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; da SILVA, A. C. L. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through Integer Linear Programming and Goal Programming. **Journal of Forest Economics**, v. 24, n. 1, p. 72-81, 2016.
- BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F. MOREIRA, J. M. M. A. P.; SILVA, L. M. S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Agendamento Otimizado da Colheita de Madeira de Eucaliptos Sob Restrições Operacionais, Espaciais e Climáticas. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 85, p. 85-95, 2010.
- BINOTI, D. H. B. **Estratégias de regulação de florestas equiâneas com vistas ao manejo da paisagem**. 2010. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- FERRARI, L. S.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L. Agendamento tático otimizado da colheita florestal em povoamentos de *Pinus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 167-176, 2019.
- FERREIRA, F. B.; DIEHL, C. A. Orçamento Empresarial e suas Relações com o Planejamento Estratégico. **Pensar Contábil**, v.14, n.54, p. 46-57, 2012.
- FIORENTIN, L. D.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L.; DAVID, H. C.; SILVA, P. H. B. M.; STANG, M. B.; FILHO, A. F. Strategies for Regulating Timber Volume in Forest Stands. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 717-726, 2017.
- GRAÇA, L. R.; RODIGHIERI, H. R.; CONTO, A. J. **Custos de produção: Conceituação e aplicação**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2017**: ano base 2016. São Paulo: IBÁ, 2017. 77 p.
- MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.;

RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations**. Springer. 2014. p. 27-59.

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical programming**, v. 97, n. 1–2, p. 267–284, 2003.

SANTOS, P. A. V. H.; SILVA, A. C. L.; ARCE, J. E.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D. A Mathematical Model for the Integrated Optimization of Harvest and Transport Scheduling of Forest Products. **Forests**, v. 10, n. 1110, p. 1 – 13, 2019.

SILVA, P. H. B. M.; ARCE, J. E.; LOCH, G. V.; DAVID, H. C.; FIORENTIN, L. D. Forest Harvest Scheduling Plan Integrated to the Road Network. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 69-76, 2016.

WERNEBURG, M. A. P. **Planejamento em grandes empresas florestais no Brasil**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2015.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

- Este trabalho usou como metodologia para o primeiro capítulo estudar os trabalhos publicados nas revistas brasileiras sobre ferramentas de Pesquisa Operacional aplicadas em território brasileiro. Para futuros trabalhos, seria interessante incluir estudos feitos no Brasil publicados em revistas estrangeiras.
- Há um GAP na aplicação de métodos de otimização em florestas tropicais, o que seria crucial para tomadas de decisão e auxílio na construção de planos de manejo sustentável, que visam aplicar a prática de exploração de impacto reduzido.
- Quanto à aplicação do modelo à um problema operacional, para futuros trabalhos, seria interessante uma otimização multi-objetivo que considerasse, além da minimização do deslocamento, critérios econômicos e também o quesito temporal. Além disso, algo que poderia ser considerado em trabalhos futuros é uma maior oferta de unidades disponíveis para a otimização da blocagem. Seguindo as mesmas premissas de como foi construído o plano da maneira tradicional da equipe de planejamento da empresa, para esse trabalho foram consideradas apenas as áreas disponíveis para atendimento da demanda daquele ano. O ideal seria uma visão de, no mínimo, 18 meses para um sequenciamento viável de 12 meses. Um maior horizonte potencializa a qualidade da resposta, uma vez que o modelo seleciona as melhores opções inicialmente e à medida que o mesmo avança no horizonte de planejamento as opções vão reduzindo. Com isso a qualidade da resposta tende a cair.

REFERÊNCIAS GERAIS

ARAÚJO, A. M.; ARAÚJO, D. O.; PASSOS, F. G. Análises das vantagens do uso da pesquisa operacional em problemas de corte: uma revisão sistemática da literatura, **Produção em Foco**, Joinville, v.08, n.2, p. 326-345, 2018.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; BINOTI, D. H. B.; SOUZA, A. P.; SANTANA, A. F.; TORRE, C. M. M. E. A multi-agent system for forest transport activity planning. **Cerne**, Lavras, v.23, n. 3, p. 329-337, 2017.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; MENDES, J. B.; CABACINHA, C. D.; ASSIS, A. L.; MATOS, L. M. A.; LEITE, H. G. Metaheuristic clonal selection algorithm for optimization of forest planning. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 6, p. 1-10, 2017.

ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 207-217, 2004.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through Integer Linear Programming and Goal Programming. **Journal of Forest Economics**, v. 24, n. 1, p. 72-81, 2016.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. Implementing minimum area harvesting blocks in an optimized forest planning Model. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 1, p. 1-8, 2017.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, Lavras, v.21, n. 4. P. 649-656, 2015.

BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F. MOREIRA, J. M. M. A. P.; SILVA, L. M. S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 85-95, 2010.

BARRA, O. S. V.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A.; CORTE, A. P. D. Proposta Metodológica para o Ajuste ótimo da distribuição diamétrica sb de johnson. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n.1, p.151-156, 2011.

BARREIROS, R. M.; GARCIA, J. N.; CAIXETA FILHO, J. V.; SANSIGOLO, C. A. Modelo de otimização para seleção de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 61, n. 1, p. 25-39, 2002.

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, 2018.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 545 p.

BINOTI, D. H. B. **Estratégias de regulação de florestas equiâneas com vistas ao manejo da paisagem**. 2010. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

DAVID, H. C.; ARCE, J.E.; OLIVEIRA, E. B.; PÉLLICO NETTO, S.; MIRANDA, R. O. V.; EBLING, A. A. Economic analysis and revenue optimization in management regimes of *Pinus taeda*. **Rev. Ceres**, Viçosa, v.64, n.3, p. 222-231, 2017.

BERGER, R.; ENGLER, J. J. C. Minimização do custo de transporte de madeira de eucalipto no estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 12, n. 1, p. 1-52, 1976.

BETTINGER, P.; CHUNG, W. The key literature of, and trends in forest-level management planning in North America. **International Forestry Review**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 40-50, 2004.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M.; OLIVEIRA, M. L. R.; CAMPOS, J. C. C.; MONTE, M. A. regulation of even-aged forests with inclusion of environmental constraints. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 29-36, 2013.

BOUCHARD, M.; D'AMOURS, S.; RONNQVIST, M.; AZOUZI, R.; GUNN, E. Integrated optimization of strategic and tactical planning decisions in forestry. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 259, n. 1, p. 1132-1143, 2017.

BRAZ, E. M.; CARNIERI, C.; ARCE, J. E. Um modelo otimizado para organização dos compartimentos de exploração em floresta tropical. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 77-83, 2004.

CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S. Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando programação Inteira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 881-887, 2013.

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**, Amsterdam, v. 380, n. 1, p. 149-160, 2016.

COSTA, M. F.; FIEDLER, N. C.; MAURI, G. R. Clustering search e simulated annealing para resolução do problema de escalonamento de motoristas no transporte de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 299-305, 2013.

DAVID, H. C. **Avaliação de sítio, relações dendrométricas e otimização de regimes de manejo de Pinus taeda L. nos estados do Paraná e de Santa**

Catarina. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) -. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

EZQUERRO, M.; PARDOS, M.; DIAZ-BALTEIRO. Operacional research techniques used for addressing biodiversity objectives into forest management: an overview. **Forests**, Basel, v. 7, n. 229, p. 1-18, 2016.

FALCÃO, A. O.; BORGES, J. G. Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal e problemas de grande dimensão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 63, n. 1, p. 94-102, 2003.

FEREZ, A. P. C.; CAMPOS, O. C.; MENDES, J. C. T.; STAPE, J. L. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 350, p. 40-45, 2015.

FERNANDES, A. P. D.; GUIMARAES, P. P.; BRAZ, E. M.; HOEFLICH, V. A.; ARCE, J. E. Alternativas de planejamento para a exploração florestal. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 339 – 350, 2013.

FERRARI, L. S.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L. Agendamento tático otimizado da colheita florestal em povoamentos de *Pinus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 167-176, 2019.

FERREIRA, F. B.; DIEHL, C. A. Orçamento Empresarial e suas Relações com o Planejamento Estratégico. **Pensar Contábil**, v.14, n.54, p. 46-57, 2012.

FIORENTIN, L. D.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L.; DAVID, H. C.; SILVA, P. H. B. M.; STANG, M. B.; FILHO, A. F. Strategies for regulating timber volume in forest Stands. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 116, p. 717-726, 2017.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. A.; SILVA, A. C. L. Comparação entre a Metaheurística Simulated Annealing e a Programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449-460, 2013.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J.E.; SILVA, A. C. L. Uso de algoritmo genético no planejamento florestal considerando seus operadores de seleção. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 460-467, 2009.

GOMIDE, L. R.; MELLO, J. M.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Automated selective thinning via multicriteria metaheuristic procedure. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 299-306, 2014.

GONÇALVES, J. C.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, S. P. C.; GOMIDE, L. R. Análise econômica da rotação florestal de povoamentos de eucalipto utilizando a simulação de Monte Carlo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1339-1347, 2017.

GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, ago. 2013.

GONZÁLEZ, L. R.; GORGENS, E. B.; RODRIGUEZ, L. C. E. Avaliação econômica não-determinística pelo método de monte carlo de plantios de Eucalyptus spp., para a produção de celulose no sudoeste paulista. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 113, p. 31-38, 2017.

GRAÇA, L. R.; RODIGHIERI, H. R.; CONTO, A. J. **Custos de produção: Conceituação e aplicação**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000.

HOOGSTRA-KLEIN, M. A.; BURGER, M. Rational versus adaptive forest management planning: exploratory research on the strategic planning practices of dutch forest management organizations: exploratory research on the strategic planning practices of Dutch forest management organizations. **European Journal Of Forest Research**, [s.l.], v. 132, n. 5-6, p. 707-716, 2013.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Histórico do desempenho do setor**. Available at: < <http://iba.org/pt/biblioteca-iba/historico-dodesempenho-do-setor/>>. Accessed in: 10/09/2018.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2017: ano base 2016**. São Paulo: IBÁ, 2017. 77 p.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives – discussion and synthesis. **Forest Science**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 1-31, 1977.

KANGAS, A.; NURMI, M.; RASINMAKI, J. From a strategic to a tactical management plan using a hierarchic optimization approach. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 29, n. 1; p. 154-165, 2014.

KELEZ, D.; BAZKENT, E. Z. A computer-bases optimization model for multiple use forest managment planning: a case study from Turkey. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 87-95, 2011.

LIMA, M. P.; CARVALHO, L. M. T.; MARTINHAGO, A. Z.; OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, S. P. C.; DUTRA, G. C.; OLIVEIRA, T. C. A. Methodology for planning log stacking using geotechnology and operations research. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 309-319, 2011.

MARQUES, G. M.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; FONTES, A. A. Aplicação da programação dinâmica na substituição de equipamentos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 749-756, 2005.

MARTINS, T. V.; GOMIDE, L. R.; FERRAZ FILHO, A. C.; SILVA, P. R.; MELO, L. A. mosaicos clonais de eucalyptus no planejamento florestal e seus efeitos econômicos e produtivos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 116, p. 727-737, 2017.

MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations**. Springer. 2014. p. 27-59.

MELLO, A. A.; CARNIERI, C.; ARCE, J. E.; SANQUETTA, C. R. Planejamento florestal visando à maximização dos lucros e a manutenção do estoque de carbono. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 205-217, 2005.

MELLO, A. A.; CARNIERI, C.; ARCE, J. E.; SANQUETTA, C. R.; WEBER, K. S. Planejamento do suprimento de matéria-prima em uma indústria florestal utilizando programação em metas e considerando o estoque de carbono. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 4, p. 341-350, 2008.

MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F.; ARCE, J. E.; MAESTRI, R. Avaliação de um sistema para otimização do sortimento de Eucalyptus sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 247-258, 2008.

NASCIMENTO, F. A. F.; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MIRANDA, G. M. Uso da meta-heurística otimização por exame de partículas no planejamento florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 557-565, 2012.

NATARAJARATHINAM, M.; CAPAR, I.; NARAYANAN, A. Managing supply chains in times of crisis: a review of literature and insights. **Internacional Journal of Physical Distribution & Logistic Management**, [s.l.], v. 39, n. 7, p. 535-573, 2009.

OLIVEIRA, F.; VOLPI, N. M. P.; SANQUETTA, C. R. Aplicação de goal programming em um problema florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 89-98, 2002.

PAULA JUNIOR, G. G.; PEREIRA, A. R. Dimensionamento de uma frota de caminhões para transporte de carvão vegetal por meio da programação linear. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 21, n. 1, p. 85-95, 1980.

RODE, R.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SOUZA, A. L.; COSENZA, D. N.; BOECHAT, C. P. Applying classical forest regulation methods to smallholdings with cooperative constraints. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 2, p. 197-206, 2016.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L. Solução de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando busca tabu. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5. P. 701-713, 2003.

SCOLFORO, J. S. R. Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas. UFLA/FAEPE, Lavras, 1998, 451 p.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S. Metaheurística Simulated Annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p.247-256, 2004.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; SILVA, G. F. Metaheurística algoritmo genético para solução de problema de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 233-245, 2004.

RODRIGUES, F. L.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 769-778, 2006.

RODRIGUEZ, L. C. E.; LIMA, A. B. H. P. M. A Utilização da programação linear na determinação de uma estratégia ótima de reforma de um talhão florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 31, n. 1, p. 47-53, 1985.

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical programming**, v. 97, n. 1–2, p. 267–284, 2003.

SANTOS, P. A. V. H.; SILVA, A. C. L.; ARCE, J. E.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D.A Mathematical Model for the Integrated Optimization of Harvest and Transport Scheduling of Forest Products. **Forests**, v. 10, n. 1110, p. 1 – 13, 2019.

SHAN, Y.; BETTINGER, P.; CIESZEWSKI, C. J.; LI, RONGXIA TIFFANY. Trends in spatial forest planning. **International Journal of Mathematical and Computational Forestry Resource Sciences, Athens**, v. 1, n. 2, p. 86-112, 2009.

SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L.; RODRIGUES, F. L.; SANTOS, H. N. Problemas com o uso de programação linear com posterior arredondamento da solução ótima, em regulação florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n.5, p. 677-688, 2003.

SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; SILVA, M. L. Influência de estimativas de produção de madeira em processos de regulação florestal utilizando programação linear. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 57-72, 2003.

SILVA, M. L.; SILVA, R. F.; LEITE, H. G. Aplicação da programação dinâmica na substituição de povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1063-1072, 2007.

SILVA, P. H. B. M.; ARCE, J. E.; LOCH, G. V.; DAVID, H. C.; FIORENTIN, L. D. Forest harvest scheduling plan integrated to the road network. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 69-76, 2016.

SOARES, T. S.; VALE, A. B.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 811-820, 2003.

SOUSA, R. A. T. M.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; CAIXETA FILHO, J. V. Eficiência e otimização do transporte principal de toras curtas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 62, n. 1, p. 130-146, 2002.

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**, [s.l.], v. 123, n. 1-2, p. 233-245, 2015.

WERNEBURG, M. A. P. **Planejamento em grandes empresas florestais no Brasil**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2015.

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P.; KONOSHIMA, M. Stand-level forest management planning approaches. **Current Forestry Reports**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 163-176, 2016.

I. Fellows, Package 'wordcloud', University of California Los Angeles, California, 2014. Available: <<https://cran.r-project.org/web/packages/wordcloud/wordcloud.pdf/>>.