

Artigo de Revisão

Uma revisão crítica das ferramentas de pesquisa operacional aplicada ao planejamento florestal nos periódicos brasileiros

A critical review of operation research tools applied to forest management in brazilian journals

Lisandra Maria Alves Matos^I 
Emanuely Canabrava Magalhães^{II} 
Carlos Alberto Araújo Júnior^{III} 
Julio Eduardo Arce^I 

^IUniversidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

^{II}Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

^{III}Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, MG, Brasil

RESUMO

O uso dos métodos de otimização como ferramenta de auxílio ao manejo florestal cresceu nas últimas décadas. No entanto, há a necessidade de entender como essas técnicas foram aplicadas ao manejo florestal no Brasil. Assim, este trabalho apresenta uma visão geral sobre o comportamento da ciência florestal brasileira nesse aspecto, indicando tendências e lacunas que podem servir de base para futuros estudos. Foram selecionados os periódicos de maior relevância acadêmica na categoria florestal a partir da base de dados Journal Citation Reports. 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 meta-heurísticas), tipo de função-objetivo e categoria de restrições. Como resultado, foram encontrados 44 artigos publicados no período de 1976 a 2019. Os tipos de dados que predominaram foram os reais nos últimos anos, o que indica uma aproximação da academia no âmbito empresarial. A espécie 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 predominante 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: Manejo Florestal; Otimização Florestal; Programação Matemática

ABSTRACT

The use of optimization methods as tools to aid the forest management has grown in the recent decades. However, there is a need to understand how these techniques were applied to forest management in Brazil. Thus, this work presents an overview of the behavior of Brazilian forestry science in this aspect, indicating trends and gaps that can serve as bases for future studies. The most relevant academic journals were selected from the Journal Citation Reports database and the articles were analyzed in terms of the database used (whether real or theoretical), genus of species grown, 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 restrictions. As a result, 44 articles published in the period from 1976 to 2019 were found. The types of data that predominated were the real ones in the recent years, which indicates an approximation of the academia in the business sphere. The exotic species had a greater participation in the studies than the native ones. Strategic planning is more approached, followed by tactical and finally operational. As for the methods, there was a tendency to use combinations between classic and heuristic methods. The objective function that was most applied was to maximize revenue and the restriction involving the volumetric production. Therefore, it was possible to identify trends and gaps and analyze the results in a critical view.

Keywords: Forest Management; Forest Optimization; Mathematical Programming

1 INTRODUÇÃO

O planejamento das atividades em qualquer empreendimento é tarefa primordial, sendo responsável por definir de forma antecipada os objetivos a serem atingidos e um conjunto de planos e ações para alcançá-los, de forma a utilizar os recursos disponíveis de forma otimizada. São estabelecidos três níveis de planejamento, o estratégico (longo prazo), o tático (médio) e o operacional (curto prazo), definidos para objetivos organizacionais, departamentais e específicos, respectivamente (MATOS *et al.*, 2019). Métodos de otimização são ferramentas de auxílio ao planejamento, visto que possibilitam o uso ótimo de recursos limitados para alcance de determinado objetivo, seja ele de maximização ou minimização (FILIPPI *et al.*, 2017).

A utilização de técnicas de produção e planejamento mais avançadas tem crescido na atividade florestal, 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 sido tomadas ao longo dos anos.

Um exemplo de revisão que apresenta esse tipo de abordagem é o de Kaya *et al.* (2016), a qual mostra um levantamento das práticas de otimização aplicadas no planejamento da silvicultura. Pasalodos-Tato *et al.* (2013) também realizaram estudos na área, revisando diferentes métodos computacionais para lidar com o risco e a incerteza no planejamento florestal. Observa-se que os modelos e restrições têm se tornado cada vez mais complexos, o que abre portas para a realização de estudos que tenham como objetivo analisar quais ferramentas têm sido utilizadas para a resolução desses problemas.

Embora existam vários artigos com a aplicação de técnicas de pesquisa operacional no vasto campo do manejo florestal (BELAVENUTTI *et al.*, 2018), quando se analisa o manejo florestal brasileiro observa-se escassez de estudos nessa área. Isso pode ser considerado uma lacuna a ser preenchida, uma vez que a realidade brasileira é diferente da realidade do resto do mundo, seja em termos de produtividade das florestas (CAMPOS *et al.*, 2016; FERREZ *et al.*, 2015; VENEGAS-GONZÁLEZ *et al.*, 2016), seja pela representatividade na produção industrial do país. Para exemplificar, de acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2017), no seu último relatório, os plantios florestais ocupam 7,84 milhões de hectares e representam menos de 1% do território nacional. Essa 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 em uma 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.

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 essa 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. Entretanto, considerando-se 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.

Dessa 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 essas 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.

Para seleção dos artigos publicados nas revistas de maior relevância (conforme base JCR), foi realizada uma busca na 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.

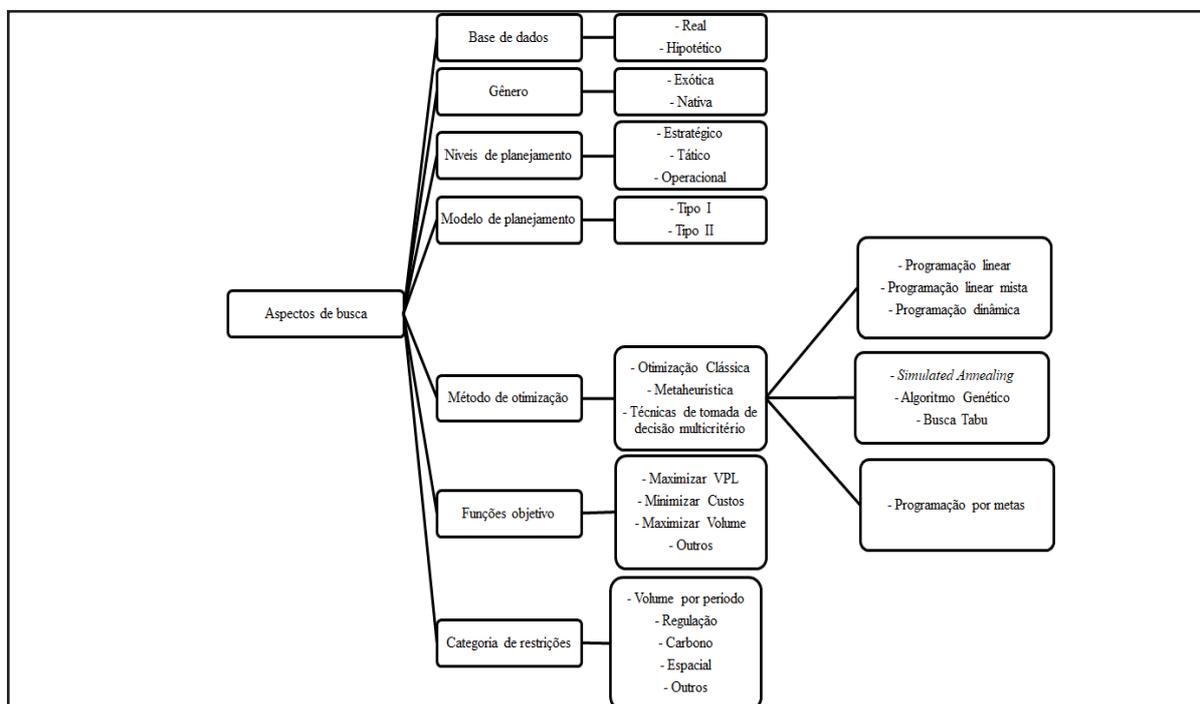
Selecionados os trabalhos, foi feita uma primeira análise baseada no ano de publicação do artigo, com o intuito de detectar a evolução no uso das técnicas de otimização na área florestal ao longo do tempo. Posteriormente, utilizando os resumos dos artigos encontrados, realizou-se uma análise gráfica a partir de uma nuvem de palavras. Essa 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.

2.1 Categorização

Os trabalhos foram categorizados conforme esquema sugerido por Belavenutti *et al.* (2018). Assim, 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.

As pesquisas foram conduzidas através do método descrito anteriormente e resumido na figura abaixo (Figura 1).

Figura 1 – Aspectos referentes ao problema de otimização avaliado em cada estudo



Fonte: Autores (2020)

Para melhor identificação dos métodos utilizados para construção dos modelos relatados nos estudos, as técnicas de otimização foram divididas em categorias e subcategorias. Na categoria Técnicas Clássicas de Otimização foram alocadas as subcategorias Programação Linear, Programação Inteira, Programação Linear Mista e Programação Dinâmica. Já a de Meta-heurística, englobava *Simulated Annealing*, Algoritmo Genético e Busca Tabu. Finalmente, as Técnicas de Tomada de Decisão Multicritério, se tratando da Programação por Metas.

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”.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

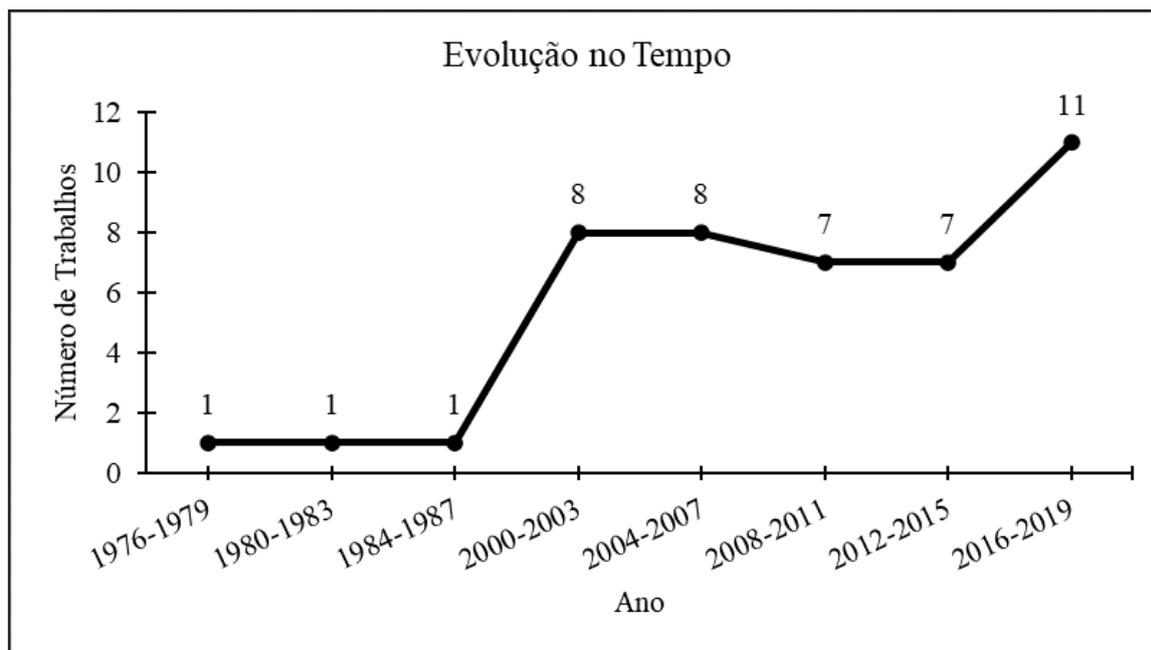
Como resultado, foram encontrados 44 artigos publicados no período de 1976 a 2019. As revistas que se enquadravam na metodologia proposta foram a *Cerne* (publicada pela Universidade Federal de Lavras), *Ciência Florestal* (publicada pela Universidade Federal de Santa Maria), *Revista Árvore* (publicada pela Universidade Federal de Viçosa) e a *Scientia Forestalis* (publicada pelo IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais). Dos artigos científicos encontrados, mais da metade eram da *Scientia Forestalis* (34%), juntamente com a *Árvore* (32%), seguidos pela *Cerne* (20%) e, por último, *Ciência Florestal* (14%). Dos 35 autores principais, seis deles são responsáveis por 35% das publicações, pertencendo às instituições de ensino Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Universidade Federal de Lavras (UFLA) e Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Analisando-se 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 relacionados a esse tema publicados em revistas nacionais, com ênfase no último período de três anos analisado (2016-2019), no qual houve 11 publicações científicas na área (Figura 2).

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 desse 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.

Figura 2 – Número de artigos publicados ao longo dos anos



Fonte: Autores (2020)

É possível estabelecer uma outra teoria para esse aumento de publicações nos últimos anos. Hoje em dia, uma filosofia do “just in time” (OHNO, 2011) tem prevalecido onde as cadeias de abastecimento e os seus modelos de planejamento têm 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. 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, auxiliando na tomada de decisões.

A categorização dos estudos de acordo com os dados usados mostra que a maior parte dos artigos encontrados trabalham com estudos de caso, com informação real de problemas florestais (Figura 4). Tais estudos correspondem a 72% dos estudos analisados.

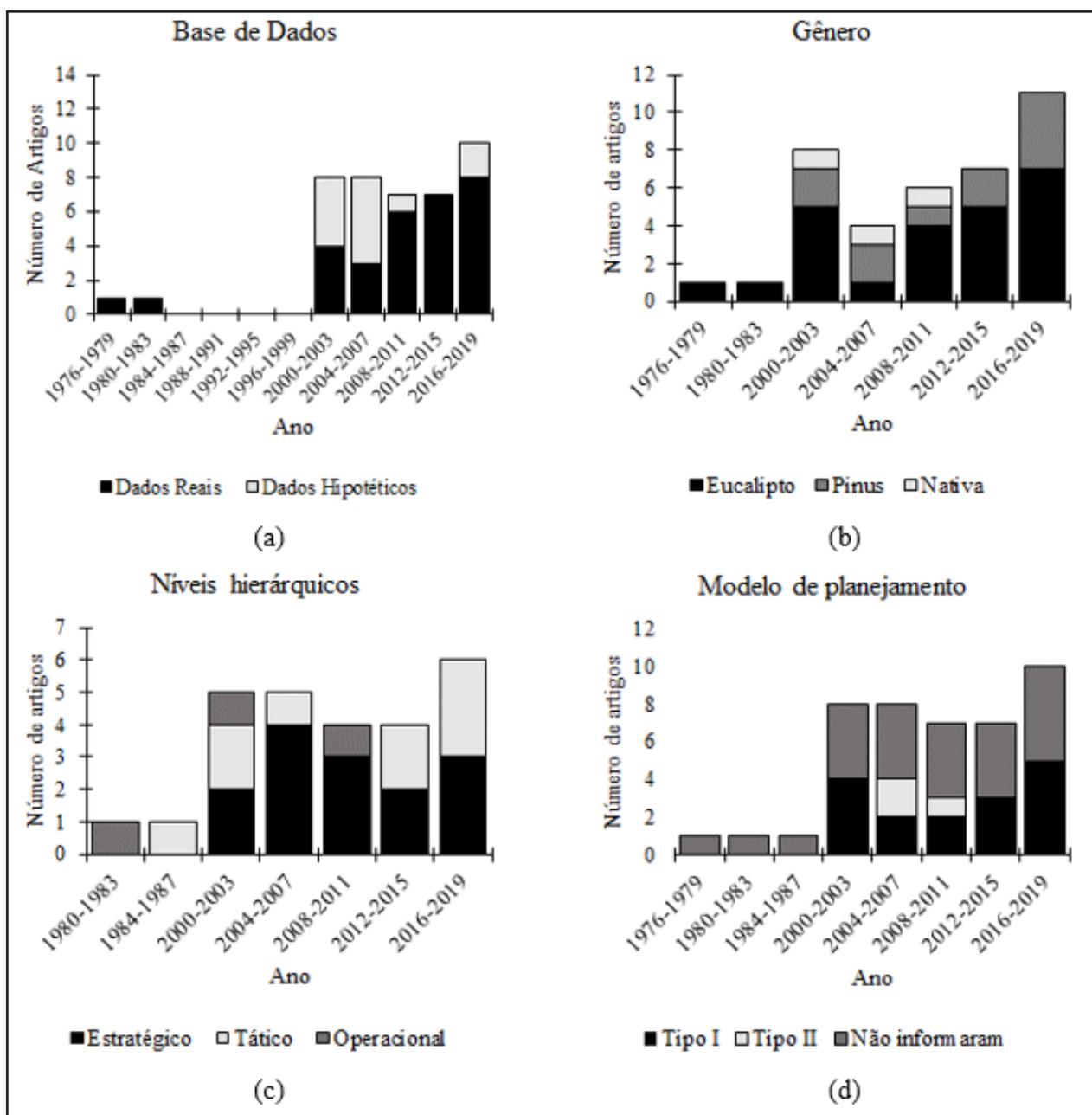
No que diz respeito à base de dados utilizada, é possível inferir que os pesquisadores certamente gostariam de testar seus métodos em dados reais, mas devido à complexidade dos seus problemas de planejamento, estes muitas vezes recorrem a testar seus métodos em dados hipotéticos (ARAÚJO JÚNIOR *et al.*, 2017). 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. No entanto, desde 2008, tem havido um aumento na aplicação de ferramentas de otimização em dados reais (Figura 4a) e isso pode ser uma tendência visto que as empresas têm aberto cada vez mais suas portas à pesquisa, lembrando que os pesquisadores devem concordar em ocultar a origem dos dados, preservando a identidade das organizações.

As espécies florestais mais comumente representadas nos artigos avaliados foram aquelas que pertencem ao gênero *Eucalyptus* (em 69% dos artigos), em função da possibilidade do uso da madeira em uma infinidade de propósitos e características requeridas, o que levou grandes e pequenas empresas a estabelecerem florestas com a espécie (GONÇALVES *et al.*, 2013). Em seguida, aparece o gênero *Pinus* (31% dos artigos), que ainda predomina nas florestas comerciais no sul do país (Figura 4b).

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. Os métodos de otimização encontrados para as nativas foram a programação linear e a programação por metas, tendo como funções-objetivo, a maximização do VPL (Valor Presente Líquido) e o atendimento da renda mínima anual. Quando se avalia a programação por metas, a função-objetivo definia como metas, a demanda madeireira e não madeireira, demanda empregatícia, maximização da produtividade em área de

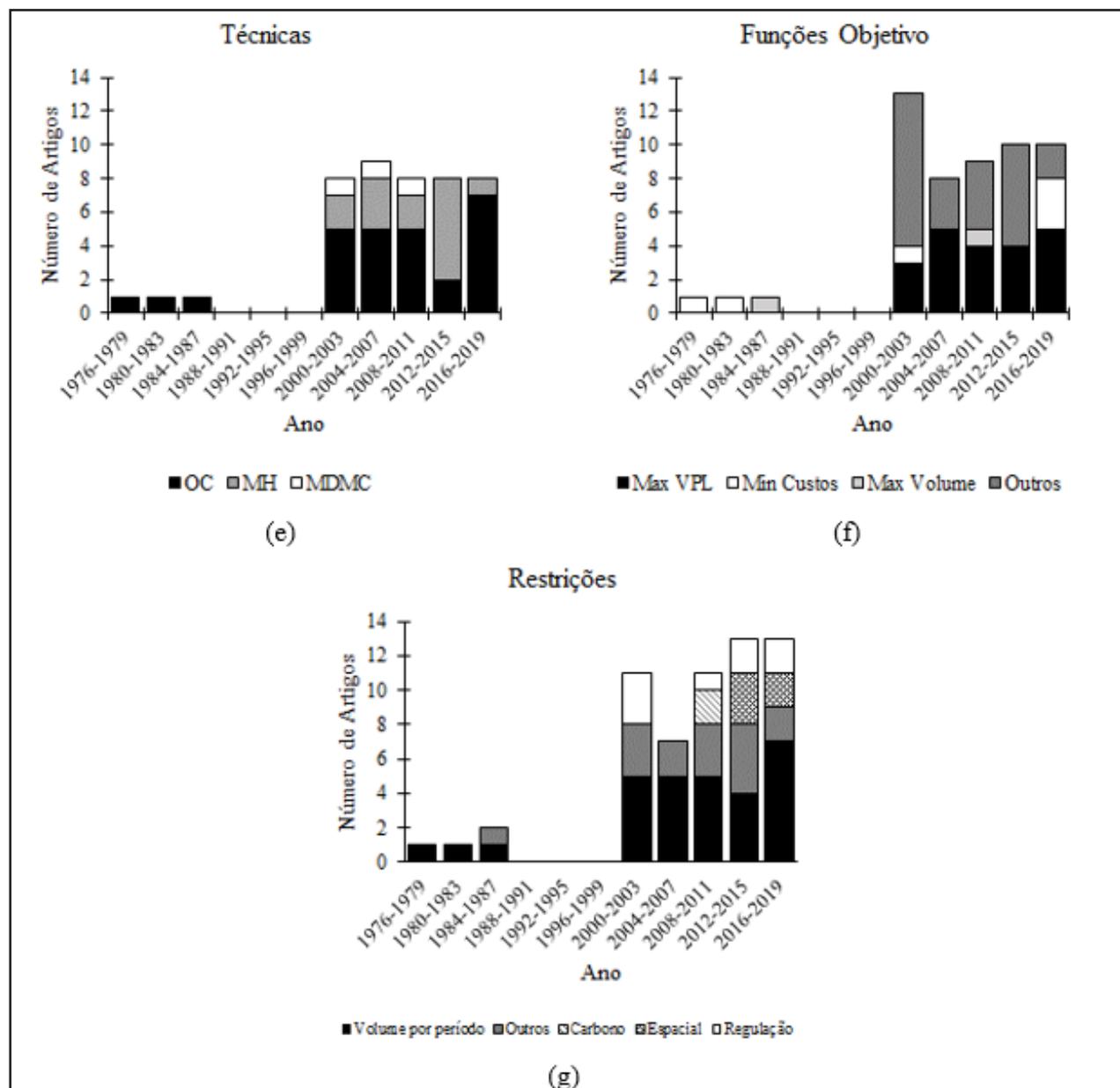
pastagem, maximização do número de turistas e metas ambientais (diversidade de flora e fauna). Quanto às restrições, estas incluíam volume por período, alcance de metas, regulação, biodiversidade e carbono.

Figura 4 – Evolução temporal do número de artigos baseado no tipo de dados (reais e hipotéticos), técnicas de otimização, funções-objetivo, restrições, modelo de planejamento, níveis hierárquicos e gênero das espécies usados em seus estudos



Continua ...

Figura 4 - Conclusão



Fonte: Autores (2020)

Em que: Onde: OC = Otimização Clássica; MH = Meta-heurística; MDMC = Métodos de Decisão por Multicritério.

O uso de técnicas de pesquisa operacional em florestas nativas tem ganhado importância em 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 auxílio ao planejamento da produção (FERNANDES *et al.*, 2013).

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) (Figura 4c).

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, poucos trabalhos se encontram na literatura 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 em nível tático e estratégico.

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. Os resultados dessa pesquisa mostram que o Modelo I é o 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 (Figura 4d).

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).

Quando se trata de técnicas de otimização usadas para resolver os problemas propostos, 61% dos estudos usam algoritmos clássicos, 32% deles usam meta-heurística e 7% usam alguma técnica de análise de decisão multicritério (Figura 4e). 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 2000 e 2011 não têm sido aplicados nos últimos períodos.

Avaliando as técnicas de otimização utilizadas, como mostra a Figura 4e, 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 (AKBULUT *et al.*, 2017; GOMIDE *et al.*, 2013). Os tipos de métodos de otimização aplicados ao planejamento florestal são interessantes de várias perspectivas, incluindo: (a) alguns métodos são mais bem 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 (KAYA *et al.*, 2016). Sabe-se que alguns artigos científicos descrevem o uso de mais de uma técnica de planejamento (ARAÚJO JÚNIOR *et al.*, 2018; AKBULUT *et al.*, 2017; GOMIDE *et al.*, 2013; COSTA *et al.*, 2013), 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 (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Contudo, à medida que a dimensão do problema aumenta, pode ser impossível resolver grandes problemas utilizando métodos analíticos rastreáveis, sugerindo que seja necessário o desenvolvimento e aplicação de métodos heurísticos (YOSHIMOTO *et al.*, 2016). Por isso, o uso da meta-heurística tem ganhado mais e mais espaço na solução de problemas na área florestal, como observado desde os anos 2000 e mais recentemente em trabalhos do Araújo Júnior *et al.* (2017, 2018) e Binoti *et al.* (2014). Tal ferramenta tem a habilidade de gerar soluções bem próximas do ótimo em um período de tempo relativamente pequeno.

Ao analisar as funções-objetivo dos problemas abordados na literatura consultada, observa-se 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 4f). 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. Para ambos os gêneros de floresta (exótica e nativas), a maximização do VPL é uma função-objetivo em comum, porém, para florestas nativas é possível destacar o uso de funções-objetivo do tipo ambiental, para atendimento da legislação e conservação da biodiversidade.

Quanto às restrições impostas nos modelos de otimização, destaca-se a que é relacionada à produção volumétrica ao longo do tempo. Essa restrição está presente em 49% dos artigos analisados aqui. De fato, tal restrição é clássica em modelos de planejamento da produção florestal, desde os estágios iniciais desta atividade (Figura 4g). Para florestas nativas, além de restrições de produtividade, observam-se restrições de caráter ambiental referentes à biodiversidade e ao sequestro de carbono, o que reforça a necessidade de integração entre variáveis de caráter produtivo e ambiental em modelos de otimização, de forma a contribuir para um manejo sustentável.

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 4f). Essa 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 o surgimento de funções-objetivo com caráter não produtivo, como a conservação da biodiversidade e proteção ambiental, esta não é uma realidade brasileira. Apenas dois 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 essa 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 multiobjetivos (AUGUSTYNCZIK *et al.*, 2016), subproduto por volume e por classes de diâmetro (CAMPOS *et al.*, 2013), taxa ideal de reforma para áreas pós-corte 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 diversas maneiras nas quais os resultados da pesquisa são estruturados, esses aspectos são mais difíceis de serem compreendidos, 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.

4 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.

Otimização no nível estratégico vem sendo amplamente utilizada, seguida do nível tático. Como perspectiva, o nível operacional poderia ter um maior foco para estudos futuros, uma vez que esse nível é uma importante restrição para ganhos em longo prazo.

Modelo tipo I continua sendo o mais utilizado, mas é reconhecido que o Modelo tipo II é o mais recomendado para florestas nativas.

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 se aponta a restrição espacial, que tem sido uma tendência principalmente devido à pressão que as empresas sofrem para se preocuparem com o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

AKBULUT, R.; BETTINGER, P.; UCAR, Z.; OBATA, S.; BOSTON, K.; SIRY, J. Spatial forest plan development using heuristic processes seeded with a relaxed linear programming solution. **Forest Science**, Oxford, v. 63, n. 5, p. 518-528, oct. 2017.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; MENDES, J. B.; ASSIS, A. L. de; CABACINHA, C. D.; STOCKS, J. J.; SILVA, L. F. da; LEITE, H. G. Tuning of the metaheuristic variable neighborhood search for a forest planning problem. **Cerne**, Lavras, v. 24, n. 3, p. 259-268, jul./set. 2018.

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

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**, Amsterdã, v. 24, p. 72-81, aug. 2016.

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 S_b de Johnson. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 151-156, 2011.

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

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M.; RIBEIRO, C. A. A. S. Inclusão e influência de características espaciais em modelos de regulação florestal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 157-164, jan./mar.2014.

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, MG, 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**, Amsterdã, v. 380, p. 149-160, 15 nov. 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, set. 2013.

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

FELLOWS, I. **Word clouds**. [S. L.: s. n.], 24 ago. 2014. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/wordcloud/wordcloud.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2020.

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**, Amsterdã, v. 350, p. 40-45, 15 aug. 2015.

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

FILIPPI, C.; MANSINI, R.; STEVANATO, E. Mixed integer linear programming models for optimal crop selection. **Computers & Operations Research**, v. 81, p. 26-39. may 2017.

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

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. da. Comparação entre a meta-heurística 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.

GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERREZ, 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**, Amsterdã, v. 301, p. 6-27, 01 aug. 2013.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à pesquisa operacional**. Porto Alegre: AMGH, 2013. 1028 p.

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.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2017 = Report 2017**. Disponível em: https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 02 abr. 2019.

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

KAYA, A.; BETTINGER, P.; BOSTON, K.; AKBULUT, R.; UCAR, Z.; SIRY, J.; MERRY, K.; CIESZEWSKI, C. Optimisation in forest management. **Current Forestry Reports**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 1-17, 2016.

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

MATOS, L. M. A.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; ASSIS, A. L. de; CABACINHA, C. D.; FERREIRA, P. H. B.; MAGALHÃES, E. C. Influência dos parâmetros da metaheurística algoritmo genético em um problema de planejamento florestal. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 6, n. 4., p. 767-774, 2019.

OHNO, K. The optimal control of just-in-time-based production and distribution systems and performance comparisons with optimized pull systems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdã, v. 213, n. 1, p. 124-133, 16 aug. 2011.

PASALODOS-TATO, M.; MÄKINEN, A.; GARCIA-GONZALO, J.; BORGES, J. G.; LÄMÄS, T.; ERIKSSON, L. O. Review. Assessing uncertainty and risk in forest planning and decision support systems: review of classical methods and introduction of new approaches. **Forest Systems**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 282-303, 2013.

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, MG, v. 30, n. 5, p. 769-778, 2006.

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, p. 233-245, 2016.

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

Contribuição de Autoria

1 – Lisandra Maria Alves Matos

Engenheira Florestal, Ma.

<https://orcid.org/0000-0002-7601-0788> • lisandraamatos@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Administração do projeto, Recursos, Software, Visualização de dados, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

2 – Emanuely Canabrava Magalhães

Engenheira Florestal, Ma.

<https://orcid.org/0000-0002-1240-2766> • emanuelymagalhaes1@gmail.com

Contribuição: Curadoria de dados, Investigação, Administração do projeto, Recursos, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

3 – Carlos Alberto Araújo Júnior

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0003-0909-8633> • araujocaj@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação

4 – Julio Eduardo Arce

Engenheiro Florestal, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0002-4777-2310> • jarce@ufpr.com.br

Contribuição: Conceituação, Obtenção de financiamento, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação

Como citar este artigo

Matos, L. M. A.; Magalhães, E. C.; Araújo Júnior, C. A.; Arce, J. E. Uma revisão crítica das ferramentas de pesquisa operacional aplicada ao planejamento florestal nos periódicos brasileiros. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 31, n. 4, p. 2035-2055, 2021. DOI 10.5902/1980509853248. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509853248>.