



Modelagem Computacional no Sertão Mineiro



PPGMCS
Programa de Pós-Graduação em
Modelagem Computacional e Sistemas

SELEÇÃO DE TALHÕES NO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE COLHEITA: UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA BALANCEAMENTO ENTRE ALTO FUSTE E TALHADIA

Pedro Luã Gonçalves Viegas¹ - pedrolgviegas@gmail.com

¹Universidade Estadual de Montes Claros, UNIMONTES - Montes Claros, MG, Brazil

Resumo. O planejamento operacional de colheita é um desafio combinatório complexo, necessitando de soluções que equilibrem metas de produção e preservação florestal. Pensando nisso, este estudo propôs um modelo para realizar uma seleção otimizada, baseado em heurística gulosa seguida de busca local, destinando os melhores talhões para a atividade de colheita, minimizando o desbalanceamento das áreas remanescentes entre os manejos de alto fuste e talhadia. A base florestal utilizada era composta por aproximadamente 13 mil hectares de floresta de eucalipto situada em Minas Gerais. A heurística tem como objetivo a priorização de talhões mais velhos, utilizando uma equação multicritério de pontuação, enquanto a busca local trabalha na aplicação de trocas, buscando a primeira melhoria. Foram utilizados quatro cenários de demanda com variações de 350 mil a 500 mil m³. Os resultados demonstraram que o algoritmo produziu soluções operacionais viáveis e que a busca pela homogeneização dos regimes aumenta de forma proporcional à meta de produção. No cenário de maior demanda, obteve-se uma eficiência de 13,21%, evidenciando que maiores volumes oferecem flexibilidade combinatória, melhorando a floresta sem penalizar significativamente a idade média de colheita. Conclui-se que métodos heurísticos são fundamentais para garantir a estrutura e o suprimento contínuo em florestas heterogêneas.

Palavras-chave: Balanceamento Florestal, Heurística, Otimização Combinatória, Busca Local, Planejamento de Colheita

1. INTRODUÇÃO

O planejamento florestal tem, em meio às suas atividades, a gestão de ativos biológicos, onde existe a necessidade de conciliar restrições operacionais e econômicas, além de acontecer em diferentes períodos. Um dos pontos de complexidade na gestão de grandes florestas está na variedade combinatória quando tentamos definir como será feita a seleção de talhões de forma que atenda aos cronogramas de colheita. Conforme discutido por Bettinger (2025), a tentativa de solucionar tais problemas exclusivamente por meio de métodos exatos de programação linear

muitas vezes encontra limitações computacionais, especialmente quando o número de talhões e restrições de vizinhança ou até mesmo características de cada talhão aumenta drasticamente.

Devido a estes contextos, está sendo cada vez mais utilizada a modelagem com métodos heurísticos, que, embora não garantam o ótimo global, demonstram eficácia em se conseguir soluções viáveis com alta qualidade dentro de tempos computacionais aceitáveis. Com estes novos objetivos, conforme apontado por Bettinger et al. (2017), o planejamento florestal moderno evoluiu para além da simples maximização da oferta de madeira; ele exige um equilíbrio multiobjetivo entre metas de produção, sustentabilidade, biodiversidade e floresta resiliente ao longo do tempo.

Podemos observar que, para realizar este processo de gestão em atividades florestais sem o suporte de ferramentas de otimização, tornou-se uma atividade muito difícil e praticamente impossível de se realizar manualmente. A abordagem de busca, como a busca local mencionada por Bettinger et al. (2017), oferece flexibilidade para tratar problemas em que o balanceamento entre diferentes regimes de manejo — como as áreas de alto fuste e talhadia — é a premissa central. Esta pesquisa está presente nesta lacuna, propondo uma abordagem baseada em heurística gulosa seguida de busca local, pensando em otimizar a seleção de talhões para atendimento de uma meta anual de colheita. Onde a prioridade é colher talhões mais velhos, não deixando de lado a minimização do desbalanceamento florestal, que deve ser feito de forma gradual, simultaneamente com a viabilidade operacional e a continuidade da produção.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um dos pontos observados para ocorrência da heterogeneidade nas áreas de florestas plantadas é a diferença de manejo que ocorre quando se tem áreas implantadas por mudas (alto fuste) e aquelas originadas pela condução da brotação de cepas (talhadia). Essa complexidade natural exige que os modelos de planejamento de colheita considerem algumas particularidades em relação ao crescimento e capacidade produtiva presente em cada manejo, conseguindo assim evitar o esgotamento de áreas mais produtivas e o desbalanceamento florestal remanescente.

Estudos demonstram que o comportamento de desenvolvimento dendrométrico, que determina o volume das árvores e suas respectivas partes, apresenta diferença entre manejos. Conforme evidenciado por Piva et al. (2020), diferenças significativas podem ser observadas na distribuição diamétrica de povoamentos conduzidos sob regimes de alto fuste e talhadia. Os autores verificaram que os povoamentos de alto fuste apresentaram árvores de maior porte em todas as idades avaliadas, além de observarem uma tendência de estabilização do crescimento diamétrico antes do sétimo ano.

Tal comportamento reforça a utilização da idade como critério de priorização dos talhões. Essa dinâmica biológica tem ligação direta nas várias estratégias de otimização de colheita. Tal estabilização reforça a premissa de que manter talhões além desta idade pode resultar em diminuição produtiva, além da perda de eficiência em relação ao uso do solo. Justificando a técnica utilizando priorização focada em talhões mais velhos.

No contexto da modelagem de decisões e pesquisa operacional, incorporar essas diferenças de crescimento não é trivial. A desigualdade no desenvolvimento entre manejos pode gerar desbalanceamento nas faixas etárias da floresta, dificultando o atendimento contínuo das metas de produção ao longo do horizonte de planejamento. Por esse motivo, o desenvolvimento de algoritmos de busca, como as heurísticas construtivas (gulosas) e de melhoria (busca local), se faz essencial. Ao aliar a premissa de colheita dos talhões mais velhos — validada pelo

comportamento de estabilização do crescimento (Piva et al., 2020) — com a exploração de vizinhanças para refinar a seleção, a abordagem heurística busca não apenas suprir a demanda volumétrica, mas garantir também um mosaico florestal equilibrado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Base de Dados e Caracterização da Área de Estudo

O estudo de caso foi desenvolvido a partir de uma base de dados florestal localizada no estado de Minas Gerais, região com a maior área de plantação de eucalipto no Brasil, alta produtividade e uso de manejos distintos. A base de dados continha 436 talhões, com um total aproximado de 13 mil hectares. Os dados mostraram uma diferença grande entre manejos, sendo composta por 82,5% de área em alto fuste e 17,5% sob talhadia, mostrando um índice de balanceamento inicial de 34,95%.

3.2 Definição do Problema e Metas de Produção

A seleção consiste em separar um subconjunto de talhões para colheita que satisfaça as demandas operacionais. Esta seleção deve também minimizar o desbalanceamento entre manejos nas áreas remanescentes. Para quantificar o nível de homogeneidade florestal, foi definido um indicador de balanceamento baseado na distribuição de áreas entre o Alto Fuste (AF) e a Talhadia (TH) remanescentes. O indicador foi calculado conforme a Equação (1).

$$\text{Balanceamento} = \left(1 - \frac{|AF - TH|}{AF + TH} \right) \times 100 \quad (1)$$

O indicador assume valores entre 0% e 100%, sendo que valores próximos de 100% representam distribuições mais homogêneas entre os manejos, enquanto valores próximos de 0% indicam um alto desbalanceamento.

Para avaliar a flexibilidade e a robustez dos algoritmos propostos, o modelo foi testado utilizando quatro cenários com distintas metas de volume para colheita: 350.000, 400.000, 450.000 e 500.000 m³.

3.3 Algoritmo Construtivo: Heurística Gulosa

A solução inicial foi desenvolvida por meio de uma heurística gulosa, que foi baseada em uma pontuação multicritério, visando priorizar a colheita de talhões mais velhos sem esquecer da necessidade de homogeneização. Primeiramente, foi identificado o manejo majoritário da base de dados (neste cenário, o alto fuste).

Foi criada uma variável binária para a proporção de manejo (Valor manejo), onde os talhões de alto fuste receberam o valor 1 e os de talhadia o valor 0. A priorização de colheita de cada talhão foi então definida conforme a Equação (2), ponderando a idade do talhão e a representatividade do tipo de manejo, chamada de Score:

$$\text{Score} = 0.8 \times \text{Idade} + 0.2 \times \text{Valor}_{\text{manejo}} \quad (2)$$

Os pesos foram definidos empiricamente, priorizando a idade dos talhões como critério principal, buscando a redução gradual do desbalanceamento florestal. Os talhões foram ordenados de forma decrescente com base no score obtido. O algoritmo selecionou iterativamente os talhões do topo da lista até que o volume acumulado atingisse o primeiro valor superior à meta de produção de cada cenário.

3.4 Refinamento da Solução: Busca Local

Com a solução inicial gerada, foi aplicado um algoritmo de busca local. A intenção desta lógica foi aprimorar o balanceamento das áreas remanescentes. O procedimento acontece com a exploração de vizinhos por meio de troca, substituindo talhões previamente selecionados por aqueles não selecionados.

Para garantir a viabilidade das trocas, a avaliação de um novo talhão candidato foi submetida a restrições rigorosas:

- i. **Filtro de idade:** A idade do talhão candidato precisava ser igual ou superior a 90% da idade média do conjunto de talhões selecionados pela heurística gulosa.
- ii. **Restrição de demanda:** O novo volume total após a troca deveria permanecer dentro de uma margem de tolerância de 5% em relação à meta original de colheita. A tolerância foi adotada para ter flexibilidade operacional.
- iii. **Função objetivo:** A troca precisava resultar em uma melhoria no índice de balanceamento dos talhões remanescentes quando comparado com o balanceamento de referência (inicialmente dado pela solução gulosa e atualizado a cada iteração bem-sucedida).

A estratégia adotada foi a de primeira melhora. Dessa forma, o algoritmo aceitava e aplicava a primeira troca válida que gerasse melhoria conforme itens de restrição descritos. Ao confirmar uma troca, a busca interrompia a avaliação de novos candidatos e avançava para o próximo talhão selecionado, garantindo eficiência computacional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desempenho das Heurísticas e Melhoria do Balanceamento

A aplicação da heurística gulosa seguida pelo algoritmo de busca local demonstrou ser eficaz na geração de soluções viáveis em todos os cenários avaliados (350.000 a 500.000 m³). A partir do índice de balanceamento inicial de 34,95%, observou-se que a própria solução da heurística gulosa já proporcionou ganhos significativos. Contudo, a etapa de refinamento via busca local melhorou o balanceamento e eficiência, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparativo entre a solução gulosa e a busca local.

Meta (m ³)	Abordagem	Idade Média	Balanceamento	Δ Idade	Δ Balanceamento	Eficiência
350 mil	Gulosa	8.49	38.77%	0.02	0.04%	2.00%
	Busca Local	8.47	38.81%			
400 mil	Gulosa	8.31	39.80%	0.08	1.01%	12.63%
	Busca Local	8.23	40.81%			
450 mil	Gulosa	8.15	40.95%	0.12	1.52%	12.67%
	Busca Local	8.03	42.47%			
500 mil	Gulosa	8.04	42.13%	0.14	1.85%	13.21%
	Busca Local	7.90	43.98%			

A eficiência foi calculada pela razão entre o ganho de balanceamento (Delta Balanceamento) e a redução na idade média (Delta Idade), devido ao compromisso entre homogeneização e priorização por idade.

Os resultados mostraram uma correlação positiva entre a meta de produção e a efetividade da busca local. No cenário de 350 mil m³, a flexibilidade para combinações foi restrita, resultando em um ganho de balanceamento de apenas 0,040%. Em contrapartida, à medida que a demanda de produção aumentou, o conjunto de talhões selecionados inicialmente foi maior, tendo maior margem para as trocas. No cenário de 500 mil m³, o balanceamento final atingiu 43,98% (um ganho de 1,850% em relação à gulosa), penalizando a idade média em apenas 0,14 anos. O salto na eficiência, de 2,00% para 13,21%, evidencia que, em metas maiores, a redução na idade média dos talhões é compensada pela melhora no balanceamento entre manejos.

4.2 Discussão e Viabilidade Operacional

Os resultados validam a premissa de que o planejamento de colheita florestal, dadas as suas restrições e complexidade combinatória, acaba se beneficiando de abordagens heurísticas. Bachmatiuk, Garcia-Gonzalo e Borges (2015) destacam em suas análises que a aplicação de métodos heurísticos é frequentemente a alternativa mais viável para obter soluções de alta qualidade em tempos computacionais factíveis. A estratégia de aceitação de primeira melhoria adotada neste estudo reflete essa necessidade de balancear a qualidade da solução com o esforço computacional.

Além disso, a capacidade do modelo de se adaptar às restrições florestais em diferentes metas de produção reforça a versatilidade para este tipo de abordagem. Quintero Méndez (2017) demonstra que modelos heurísticos de planejamento florestal possuem flexibilidade suficiente para integrar objetivos complexos — como o sequestro de carbono — sem perder a viabilidade de execução. De forma semelhante, a proposta nesta pesquisa adaptou a heurística para tratar um objetivo não trivial: o balanceamento proporcional entre áreas florestais. O respeito às restrições garante que a solução seja uma ferramenta operacional aplicável à gestão florestal.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa demonstrou a viabilidade e a eficácia da aplicação de métodos heurísticos para a seleção e otimização do planejamento operacional de colheita, com foco no

balanceamento florestal. A integração de uma heurística construtiva (gulosa) a um algoritmo de busca local permitiu atender às metas de produção, priorizando a colheita de talhões em idade de estabilização produtiva.

Conclui-se que a efetividade da busca local para a homogeneização florestal está diretamente relacionada à quantidade da meta de produção. Cenários com maiores demandas dão maior flexibilidade combinatória ao modelo, permitindo trocas mais vantajosas, elevando a eficiência do balanceamento (atingindo ganhos de até 1,85%, com eficiência de 13,21% na relação entre balanceamento e idade média no cenário de 500 mil m³) com redução mínima da idade média da colheita. Além disso, a estratégia de primeira melhora combinada com a tolerância de variação de volume, garantiu que as soluções fossem geradas em tempos computacionais adequados com aplicabilidade operacional.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de meta-heurísticas mais complexas, para explorar um espaço de soluções ainda mais amplo, bem como a incorporação de restrições espaciais, distribuindo estes talhões selecionados em blocos menores mês a mês, visando não apenas o balanceamento de regimes, mas a dispersão geográfica da colheita.

Agradecimentos

O autor agradece ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS), especialmente aos professores Allysson Steve Mota Lacerda e João Batista Mendes, pelo apoio acadêmico durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como à empresa parceira pela disponibilização dos dados utilizados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BACHMATIUK, J.; GARCIA-GONZALO, J.; BORGES, J. G. Analysis of the performance of different implementations of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling. *Silva Fennica*, Helsinque, v. 49, n. 4, id. 1326, 2015.
- BETTINGER, P. *Forest Harvest Scheduling: From Linear Programming to Heuristic Search*. Cham: Springer, 2025.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K. Forest Planning Heuristics—Current Recommendations and Research Opportunities for s-Metaheuristics. *Forests*, Basileia, v. 8, n. 12, p. 476, 2017.
- PIVA, L. R. O.; RUZA, M. S.; HECK, T. O.; DALLA CORTE, A. P.; PÉLLICO NETTO, S.; BEHLING, A. Efeito dos regimes de alto fuste e talhadia na distribuição diamétrica de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 48, n. 127, e3224, 2020. DOI: 10.18671/scifor.v48n127.15.
- QUINTERO-MÉNDEZ, M. A.; JEREZ-RICO, M. Heuristic forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, Viterbo, v. 10, n. 2, p. 430-439, 2017.