

**ANA CAROLINA DE ALBUQUERQUE SANTOS**

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA PLANEJAMENTO  
OPERACIONAL INTEGRADO DAS ATIVIDADES DE  
COLHEITA, BALDEIO E TRANSPORTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Helio Garcia Leite

Coorientadores: Carlos Antônio A. Ribeiro  
Soares  
José Marinaldo Gleriani

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da  
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237m  
2019 Santos, Ana Carolina de Albuquerque, 1984-  
Modelagem matemática para planejamento operacional integrado  
das atividades de colheita, baldeio e transporte / Ana Carolina de  
Albuquerque Santos. - Viçosa, MG, 2019.  
76 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Helio Garcia Leite.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Planejamento - Modelos matemáticos. 2. Otimização. I.  
Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.976

**ANA CAROLINA DE ALBUQUERQUE SANTOS**

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA PLANEJAMENTO  
OPERACIONAL INTEGRADO DAS ATIVIDADES DE  
COLHEITA, BALDEIO E TRANSPORTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 17 de maio de 2019.

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Ana Carolina de Albuquerque Santos  
Autora

  
\_\_\_\_\_  
Helio Garcia Leite  
Orientador

*A Deus; a minha mãe, Dorinha; ao meu pai, Sandoval; a minha irmã, ao meu irmão e aos demais familiares. Aos meus amigos e amigas. Em especial, ao professor Helio Garcia.*

*A persistência é o caminho do êxito.*

Charles Chaplin

## **AGRADECIMENTOS**

Início meus agradecimentos por DEUS, por me privilegiar com pessoas especiais ao me redor.

Agradeço em especial ao meu orientador, Helio Garcia Leite, por sempre acreditar em mim, me mostrar o caminho da Ciência, estimulando o meu desejo de aprender cada vez mais. Por ser mais que um orientador, um amigo, fazendo parte da minha vida nos momentos bons e ruins. Pelas risadas nos momentos de aperto, pelo bom humor e muitos ensinamentos. Será sempre a minha referência profissional e pessoal para meu crescimento.

Agradeço ao meu pai e a minha mãe, pelos valores que me foram ensinados. Renunciando aos seus sonhos para que eu pudesse realizar o meu. E ao meu irmão e a minha irmã, pela compreensão, pelo apoio e carinho.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo. E aos professores do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pelos ensinamentos na minha graduação e pós-graduação.

Deixo aqui meu agradecimento aos professores e doutores que contemplaram a banca da qualificação e da defesa da tese, por sua disponibilidade, críticas e sugestões, facilitando o alcance dos objetivos propostos.

Agradeço aos meus muitos amigos e amigas de Viçosa, pelos momentos de descontração, compreensão e apoio.

Agradeço também a empresa Duratex, por me liberar para a finalização da escrita e defesa da tese.

## RESUMO

SANTOS, Ana Carolina Albuquerque, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2019. **Modelagem matemática para planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte.** Orientador: Helio Garcia Leite. Coorientadores: Carlos Antônio Alvares Ribeiro Soares e José Marinaldo Gleriani.

No primeiro capítulo deste estudo é apresentada uma abordagem geral do planejamento hierárquico, nos seus três níveis (estratégico, tático e operacional), destacando o estado da arte e a modelagem básica, com foco na função objetivo e nas restrições e premissas do manejo. O referencial teórico apresentado no capítulo 1 demonstra que a modelagem matemática do problema de planejamento operacional até a condução deste estudo era incipiente, o contrário ocorrendo em relação ao planejamento estratégico. De forma similar que nos planos estratégicos, os modelos I, II e III podem ser utilizados para o sequenciamento mensal das atividades de colheita no ano. A estrutura desses modelos, permite considerar diferentes restrições operacionais em função das necessidades específicas de cada empresa, e integrar restrições dos níveis táticos e estratégicos aos modelos operacionais. No segundo capítulo é apresentada uma proposta de abordagem e modelagem matemática para o planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte de madeira. Um estudo de caso foi utilizado para demonstrar o nível de detalhamento das informações utilizadas para aplicação da formulação proposta. A variável de decisão foi definida em função dos fatores que afetam as atividades de colheita e baldeio. Para a integração do sequenciamento das atividades no tempo foi utilizado a curva de secagem da madeira. Informações de custo e rendimentos das atividades foram obtidas da literatura. A rota de transporte e microplanejamento do baldeio foram obtidas por métodos de menor caminho. Para a resolução do modelo foi utilizada a programação inteira mista e métodos de particionamento do problema. O modelo matemático proposto permite compor as diferentes fases temporais e espaciais das atividades do fluxo de aquisição de madeira, de forma genérica, podendo, com simples modificações, se adequar a situações específicas das empresas florestais. A curva de secagem da madeira permitiu integrar o horizonte de planejamento das atividades de colheita, baldeio e transporte. A abordagem de modelagem proposta neste estudo permite a simulação de diferentes cenários de planejamento operacional da colheita, em nível mensal ou semanal, podendo ser estendida para o planejamento diário.

Palavras-chave: Modelo Matemático, Otimização, Planejamento Hierárquico.

## ABSTRACT

SANTOS, Ana Carolina Albuquerque, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2019. **Mathematical modeling for integrated operational planning of harvest, extraction and transport activities.** Adviser: Helio Garcia Leite. Co-advisers: Carlos Antônio Alvares Ribeiro Soares and José Marinaldo Gleriani.

The first chapter of this study presents a general approach to hierarchical planning, at its three levels (strategic, tactical and operational), highlighting the state of the art and basic modeling, focusing on objective function and management constraints and assumptions. The theoretical framework presented in chapter 1 demonstrates that the mathematical modeling of the operational planning problem until the conduction of this study was incipient, the opposite occurring in relation to strategic planning. Similarly to strategic plans, models I, II and III can be used for monthly sequencing of harvesting activities in the year. The structure of these models allows to consider different operational constraints according to the specific needs of each company, and to integrate tactical and strategic constraints into the operational models. The second chapter presents a proposal for an approach and mathematical modeling for integrated operational planning of harvesting, extraction and timber transportation activities. A case study was used to demonstrate the level of detail of the information used to apply the proposed formulation. The decision variable was defined according to the factors that affect the harvesting and wood extraction activities. The wood drying curve was used to the integration of the activities sequencing over time. Cost and yield information from activities were obtained from the literature. The transport route and wood extraction direction were obtained by shortest path methods. Mixed integer programming methods with problem partitioning were used to model the resolution. The proposed mathematical model makes it possible to compose the different temporal and spatial phases of the wood procurement flow activities in a generic way and, with simple modifications, can be adapted to specific situations of the forestry companies. The modeling approach proposed in this study allows the simulation of different scenarios of operational planning, at monthly or weekly level, and can be extended to daily planning.

Keywords: Mathematical Model, Optimization, Hierarchical Planning.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL .....	8
2 OBJETIVOS .....	10
3 REFERÊNCIAS .....	11
CAPÍTULO 1 .....	19
PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO DA COLHEITA EM POVOAMENTOS FLORESTAIS NO BRASIL: ESTADO DA ARTE, DESAFIOS E FUTURAS DIREÇÕES.....	19
1 PLANEJAMENTO FLORESTAL HIERÁRQUICO .....	20
2 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO .....	22
3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA O PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO FLORESTAL.....	24
3.1 Restrição de área disponível para colheita .....	31
3.2 Restrição para fluxo anual de madeira .....	32
3.3 Restrição para regulação produção.....	33
3.4 Controle de corte e plantio anual.....	34
3.5 Inclusão de critérios sociais.....	35
3.6 Manejo do espaço e da paisagem .....	37
3.7 Regulação florestal envolvendo desbaste e multiprodutos.....	41
4 PLANEJAMENTO TÁTICO .....	42
5 PLANEJAMENTO OPERACIONAL .....	44
5.1 Ordenamento da colheita florestal.....	46
6 SÍNTESE .....	47
CAPÍTULO 2 .....	49
MODELAGEM MATEMÁTICA DO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DAS ATIVIDADES DE COLHEITA, BALDEIO E TRANSPORTE FLORESTAL .....	49
1 INTRODUÇÃO.....	49
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	50
2.1 Fazenda-modelo: descrição e modelo conceitual .....	50
2.2 Projeção do crescimento semanal.....	52
2.3 Custo da colheita e baldeio da madeira .....	54
2.4 Transporte da madeira .....	56
2.5 Modelagem matemática.....	57
2.5.1 Função objetivo .....	57
2.5.2 Restrições .....	63
2.5.3 Resolução do problema .....	65
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	69
4 CONCLUSÕES .....	75
4 CONCLUSÕES GERAIS .....	76

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O manejo de florestas equiâneas envolve o desenvolvimento e aplicação de métodos analíticos para decidir sobre o que, quando, como e onde plantar, reformar ou conduzir talhadias, e realizar a colheita da madeira, arrendar ou vender terras visando atender os objetivos da organização florestal de modo sustentável, atendendo premissas econômicas, ambientais e sociais. As técnicas analíticas vão desde procedimentos e métodos específicos de mensuração e manejo florestal, modelagem do crescimento e da produção e matemática financeira, até os métodos de pesquisa operacional e de inteligência artificial.

De modo geral, as decisões no manejo florestal envolvem a seleção de genótipos, espaçamentos, práticas silviculturais, determinação de regimes e idades de corte. Mas as decisões mais efetivas referem-se ao cultivo e colheita da madeira visando a sustentabilidade do empreendimento em relação a produção florestal, ou seja, a regulação da produção florestal e o planejamento nos níveis estratégico, tático e operacional.

Historicamente maior ênfase foi dada ao planejamento estratégico, principalmente com a implementação dos modelos I e II. No início esses modelos eram utilizados apenas com foco na sustentabilidade econômica. Porém, na literatura publicada nos últimos anos, componentes ambientais e sociais começaram a ser também considerados na modelagem do plano estratégico. No Brasil, as empresas florestais de grande porte, em sua grande maioria, utilizam o modelo tipo II para a otimização do plano de longo prazo com o objetivo de previsibilidade de atendimento das fábricas. Para o plano de longo prazo otimizado, essas empresas fazem uso de sistemas de suporte a decisão florestais, os quais formulam as alternativas dos planos utilizando os modelos tipo I e II da programação linear.

Por outro lado, o planejamento de curto prazo ou microplanejamento sempre foi conduzido sem uso de softwares e modelos específicos, ficando mais restrito ao emprego de simuladores em planilhas de cálculo. Nos últimos anos algumas pesquisas se concentraram nesse planejamento, envolvendo basicamente o agendamento da colheita. Entretanto, ainda são raros os estudos envolvendo a modelagem matemática nesse nível de planejamento, em parte, devido as especificidades desse microplanejamento em cada empresa, dificultando a proposição de um modelo matemático geral para esse caso.

A modelagem matemática para o curto prazo em princípio poderia ser feita, por exemplo, com o modelo II de programação linear, modificando a variável idade em anos para idade em meses, semanas ou dias, e passando o horizonte de planejamento para 12 ou 18 meses.

Mas dado o nível de detalhamento e especificidade, é necessário um aprimoramento na modelagem, de modo que o modelo seja independente de usar intervalos de meses, semanas ou dias para o planejamento das atividades. Esse o objetivo geral do presente estudo.

No primeiro capítulo deste estudo é apresentada uma abordagem geral do planejamento hierárquico, nos seus três níveis (estratégico, tático e operacional), destacando o estado da arte e a modelagem básica, com foco na função objetivo e nas restrições e premissas do manejo. No segundo capítulo é apresentada uma proposta de abordagem e modelagem para o planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte de madeira. Um estudo de caso é utilizado para demonstrar a aplicação da formulação matemática proposta.

## **2 OBJETIVOS**

Os objetivos deste estudo foram:

- i) Avaliar o estado da arte da modelagem matemática do problema de planejamento hierárquico florestal, até o momento do início da pesquisa,
- ii) Desenvolver um modelo matemático de otimização para o planejamento operacional integrando as atividades de colheita, baldeio e transporte e o detalhamento temporal e espacial das informações utilizada no processo de geração das alternativas.
- iii) Demonstrar a aplicação do modelo em um caso de uso.

### 3 REFERÊNCIAS

- AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION (AF&PA). **Sustainable forestry and certification programs in the united states**. 2016. Disponível em <<http://www.afandpa.org/docs/default-source/one-pagers/sustainable-forestry-and-certification-programs-in-the-united-states.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2019.
- ANDERSSON, D. **Approaches to integrated strategic/tactical forest planning**. 2005. 28 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Recursos) – Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Suécia, 2005.
- ANDERSSON, D.; ERIKSSON, L. O. Effects of temporal aggregation in integrated strategic/tactical and strategic forest planning. **Forest Policy and Economics**, v. 9, n. 8, p. 965-981, 2007.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. Orientador: Julio Eduardo Arce. 2014. 185 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.
- BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; SILVA, L. M. S. S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. **Scientae Forestalis**. v. 38, n. 85, p. 85-95, 2010.
- BARRET, T. M.; GILLESS, J. K. Even-aged restrictions with subgraph adjacency. **Annals Operation Research**, New Yor, v. 95, p. 159-175, 2000.
- BASKENT, E. Z.; JORDAN, G. A. Characterizing spatial structure of forest landscape. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 25, p. 1830-1849, 1995.
- BASSETT, MATTHEW H.; PEKNY, JOSEPH F.; REKLAITIS, GINTARAS V. Decomposition techniques for the solution of large-scale scheduling problems. **AICHE Journal**, v. 42, n. 12, p. 3373-3387, 1996.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological modelling**, v. 188, n. 2, p. 145-173, 2005.
- BEAUDOIN, D.; FRAYRET, J.-M.; LEBEL, L. Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical-operational planning integration. **Canadian journal of forest research**, v. 38, n. 8, p. 2198-2211, 2008.
- BETTINGER, P.; CHUNG, W. The key literature of, and trends in, forest-level management planning in North America, 1950-2001. **International Forestry Review**, v. 6, n. 1, p. 40-50, 2004.
- BETTINGER, P.; LENNETTE, M.; JOHNSON, K. N.; SPIES, T. A. A hierarchical spatial framework for forest landscape planning. **Ecological Modelling**, v. 182, p. 25-48, 2005.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest management and planning**. New York: Academic Press, 2010. p. 342.

BINOTI, D. H. B. **Estratégias de regulação de florestas equiâneas com vistas ao manejo da paisagem**. Orientador: Helio Garcia Leite. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

BINOTI, D. H. B. **Sistemas computacionais aplicados ao manejo florestal**. Orientador: Helio Garcia Leite. 2012. 131 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

BOYCHUK, D; MARTELL, D. L. A Multistage stochastic programming model for sustainable forest-level timber supply under risk of fire. **Forest Science**, v. 42, n. 1, 1996.

BREDSTRÖM, D.; JÖNSSON, P.; RÖNNQVIST, M. Annual planning of harvesting resources in the forest industry. **International transactions in operational research**, v. 17, n. 2, p. 155-177, 2010.

BUONGIORNO, J; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. 1<sup>st</sup> ed. New York: Academic Press, 2003. p. 478.

CAMPOS, J. C. C; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 470 p.

CARNIERI, C. **Planejamento florestal otimizado via redes de manejo**. Orientador: Miguel Taube Netto. 1989. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1989.

CARVAJAL, R.; CONSTANTINO, M.; GOYCOOLEA, M.; VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A. **Imposing connectivity constraints in forest planning models**. Não publicado, 2013. Disponível em: <<http://www.mit.edu/~jvielma/publications/Imposing-Connectivity-Constraints.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2018.

CASTRO, R. R. **Regulação de florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

CHURCH, R. L.; MURRAY, A. T.; BARBER, K. H. Forest planning at the tactical level. **Annals of Operations Research**, v. 95, n. 1-4, p. 3-18, 2000.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983.

CURTIS, F.H. Linear programming the management of a forest property. **Journal of Forestry**, v. 60, n. 9, p. 611-616, 1962.

DANTZIG, George B. **Linear programming and its extensions**. California: Santa Monica, 1963. 209 p. Disponível em: <<https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2007/R366part1.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2018.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N.; BETTINGER, P. S.; HOWARD, T.E. 2000. **Forest management: to sustain ecological, economic, and social values**. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw Hill, 2000. p. 804. ISBN 0-07-032694-0.

DEMS, AMIRA; ROUSSEAU, LOUIS-MARTIN; FRAYRET, JEAN-MARC. Annual timber procurement planning with bucking decisions. **European Journal of Operational Research**, v. 259, n. 2, p. 713-720, 2017.

DYKSTRA, D. P. **Mathematical programming for natural resource management**. New York: McGraw-Hill, 1984. p. 318.

EPSTEIN, R.; MORALES, R.; SERON, J.; WEINTRAUB, A. Use of OR systems in the Chilean forest industries. **Interfaces**, v. 29, n. 1, p. 7-29, 1999.

EPSTEIN, R.; KARLSSON, J.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Harvest operational models in forestry. In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJORNDAL, T.; EPSTEIN, R. (Ed.). **Handbook of operations research in natural resources**. New York: Springer, 2007. p. 365-377.

ESRI, ESRI. **ArcMap 10.2**. Redlands, USA, 2014.

ESTADOS UNIDOS. USDA Forest Service. **Spectrum** – User's guide. Fort Collins, 1999. 189 p.

EZZATI, S.; NAJAFI, A.; YAGHINI, M.; HASHEMI, A. A.; BETTINGER, P. An optimization model to solve skidding problem in steep slope terrain. **Journal of Forest Economics**, v. 21, n. 4, p. 250-268, 2015.

GARCIA, O. An interactive forest simulator for long range planning. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 11, n. 1, 1981.

GARCIA, O. Linear programming and related approaches in forest planning, **NZ J. Forest Science**, v. 20, n. 3, p. 307-331, 1990.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. L. Efeito das restrições espaciais de adjacência no planejamento florestal otimizado. **Revista Floresta**, v.40, n. 3, p. 573-584, 2010.

GUNN, E. A.; RAI, A. K. Modelling and decomposition for planning long-term forest harvesting in an integrated industry structure. **Canadian journal of forest research**, v. 17, n. 12, p. 1507-1518, 1987.

GUNN, E. Sustainable forest management: control, adaptive management, hierarchical planning. **Soil and Water**, v. 2, p. 8, 2005.

GUNN, E. Some perspectives on strategic forest management models and the forest products supply chain. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 47, n. 3, p. 261-272, 2009.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operational research**. 3. ed. Oakland, 1980. 829 p.

IVERSON, D. C.; ALSTON, R. M. **The genesis of FORPLAN a historical and analytical review of Forest Service planning models**. Washington: USDA Forest Service, 1986. 25 p. (General Technical Report, INT-214).

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

KANGAS, A; KANGAS, J; KURTTILA, M. **Decision support for forest management**. Berlin: Springer, 2008.

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

KARLSSON, J.; RÖNNQVIST, M.; BERGSTRÖM, J. An optimization model for annual harvest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 8, p. 1747-1754, 2004.

KIDD, W. E. Forest regulation and the alternative rate-A case illustration. **Journal of Forestry**, v. 67, n. 12, p. 885-887, 1969.

KIDD, W. E.; THOMPSON, E. F.; HOEPNER, Paul H. Forest regulation by linear programming-a case study. **Journal of Forestry**, v. 64, n. 9, p. 611-613, 1966.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; DE SOUZA, A. P.; GARCIA LEITE, H.; LUIZ GUEDES, I. Modelagem do desempenho da extração de madeira pelo *Forwarder*. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, 2014.

LEONELLO, E. C.; GONÇALVES, S. P; FENNER, P. T. Efeito do tempo de experiência de operadores de *Harvester* no rendimento operacional. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, 2012.

LEUSCHNER, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley e Sons, 1984. 298 p.

LIMA, M. P. **Metodologia para o planejamento da colheita e do transporte florestal utilizando geotecnologia e pesquisa operacional**. Orientador: Luís Marcelo Tavares de Carvalho. 2009. 46 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

LOUCKS, D. P. The development of an optimal program for sustained-yield management. **Journal of Forestry**, v. 62, n. 7, p. 485-490, 1964.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. (Org.). **Colheita florestal**. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 2002. 468 p.

MARTELL, D. L.; GUNN, E. A.; WEINTRAUB, A. Forest management challenges for operational researchers. **European Journal of Operational Research**, v. 104, n.1, p. 1-17, 1998.

McDILL, M. E.; BRAZE, J. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age class distribution. **Forest Science**, v. 46, n. 3, 2000.

McDILL, M.; REBAIN, S. A Mixed-integer formulation of the minimum patch size problem. **Forest Science**, v. 49 n. 4, p. 608-618, 2003.

- MONTE, M. A. **Inclusão de critérios sociais na modelagem matemática do planejamento florestal**. Orientador: Helio Garcia Leite. 2012. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- MOREIRA, J. M. M. Á. P. **A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais**. Orientador: Luiz Carlos Estraviz Rodriguez. 2008. 123 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2008.
- MOREIRA, J. M. M. Á. P.; RODRIGUEZ, L. C. E. A incorporação de corredores de conectividade no manejo de florestas industriais utilizando a heurística da razão. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 2, p. 255-282, 2010.
- MURRAY, A. T. Spatial restrictions in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 45, n. 1, 1999.
- MURRAY, A. T.; WEINTRAUB, A. Scale and unit specification influences in Harvest Scheduling with maximum area restrictions. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 779-789, 2002.
- NASCIMENTO, F. A. F. **Planejamento florestal com restrições de adjacência utilizando programação paralela**. Orientador: Júlio Eduardo Acre. 2014. 130 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, PR, 2014.
- NAUTIYAL, J. C.; PEARSE, P. H. Optimizing the conversion to sustained yield--a programming solution. **Forest Science**, v. 13, n. 2, p. 131-139, 1967.
- NAUTIYAL, J. C. **Forest economics**. Principles and applications. Toronto: Canadian Scholars' Press, 1988. 851 p.
- NAVON, D. I. **Timber ram**: A long-range planning method for commercial timber lands under multiple-use management. Research paper PSW-RP-70. Berkeley: US Department of Agriculture, EUA, 1971.
- NELSON, J. D. **Forest - Level planning**. In: Forestry handbook for British Columbia/editora, Susan, 5. ed. University of British Columbia, 2005. p. 26-44.
- OGWENO, D. C. O. **Integrated optimization of operational and tactical planning for log production**. 1995. 178 f. Thesis (Philosophy in Forestry) – University of Canterbury, Canterbury, New Zealand.
- ÖHMAN, K. Spatial optimization in forest planning: a review of recent Swedish research. In: PUKKALA, T. (Ed.). **Multi-objective forest planning**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 153-172.
- OLIVEIRA JÚNIOR, Ezer Dias; SEIXAS, Fernando; BATISTA, João Luís Ferreira. Produtividade de *feller-buncher* em povoamento de eucalipto em relevo acidentado. **Floresta**, v. 39, n. 4, 2009.
- PEREIRA, G. W. **Aplicação da técnica de recozimento simulado em problemas de planejamento florestal multiobjetivo**. Orientador: Heleno do Nascimento Santos. 2004. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

PETERNELLI, L. A.; DA SILVA, G. F.; LEITE, H. G. Uma proposta para a geração de amostras aleatórias nos problemas de simulação em modelos de planejamento. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 749-758, 2006.

PITTMAN, S. D.; BARE, B. B.; BRIGGS, D. G. Hierarchical production planning in forestry using price-directed decomposition. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 10, p. 2010-2021, 2007.

PUKKALA, T. Multiple risks in multi-objective forest planning: integration and importance. **Forest Ecology and Management**, v. 111, n. 2, p. 265-284, 1998.

REED, W. J.; ERRICO, D. Optimal harvest scheduling at the forest level in the presence of the risk of fire. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 16, n. 2, p. 266-278, 1986.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa: UFV, 2001. 389 p.

RODE, R.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R.; BINOTI, D. H. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SOUZA, A. L.; CONSENZA, D. N. Comparação da regulação florestal de projetos de fomento com áreas próprias de empresas florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 81, p. 11-19, 2015.

RODRIGUEZ, L. C. E.; LIMA, A. B. N. P. M. **A utilização da programação linear na determinação de uma estratégia ótima de reforma de um talhão florestal**. Piracicaba: IPEF, n. 31, p. 47-53, 1985.

RODRIGUEZ, L. C. E.; MARTINI, E. L. Definição da sequência operacional de corte e plantio em áreas de reforma de eucaliptais. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL, 1., Curitiba, 1989. **Anais...** Curitiba: Embrapa CNPF, 1989. p. 63-72.

RODRIGUEZ, L. C. E. **GERADOR, um programa para obtenção de matriz de gerenciamento florestal**. Piracicaba: IPEF, 1989. 11 p.

RODRIGUES, F. L. **Regulação de florestas equiâneas utilizando programação linear**. Orientador: Helio Garcia Leite. 1997. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, MG, 1997.

RODRIGUES, F. L.; LEITE H. G.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SILVA, M. L. Regulação de florestas equiâneas utilizando programação linear: uma aplicação da teoria do modelo II. **Revista Árvore**, v. 22, n. 5, p. 193-213, 1998.

RODRIGUEZ, L. C. E.; MOREIRA, R. M. Gerenciamento de florestas de eucalipto com modelos de programação linear. **Série Técnica Ipef**, n. 6, p. 1-15, 1989.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. Orientador: Helio Garcia Leite. 2001. 253 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, MG, 2001.

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

RÖNNQVIST, M.; D'AMOURS, S.; WEINTRAUB, A.; JOFRE, A.; GUNN, E.; HAIGHT, R. G.; MARTELL, D.; MURRAY, A. T.; ROMERO, C. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 11-40, 2015.

ROSCHER, M.; FJELD, D.; PARKLUND, T. Spatial patterns of round wood transport associated with mobile data systems in Sweden. **International Journal of Forest Engineering**, v. 15, n. 1, p. 53-59, 2013.

SANTANA, C. **Abordagens de solução para problemas de agendamento espacial de colheita**. Disponível em: <[http://www.remsoft.com/docs/brazil/PDF\\_F.pdf](http://www.remsoft.com/docs/brazil/PDF_F.pdf)>. Acesso em: 06 set. 2015.

SANTOS, F. L. **Regulação da produção de floresta de eucalipto submetida a desbaste e destinada a multiprodutos**. Orientador: Helio Garcia Leite. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, MG, 2008.

SANTOS, A. C. A. **Crescimento mensal de povoamentos de eucalipto na idade técnica de corte**. Orientador: Helio Garcia Leite. 2014. 42 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, MG, 2014.

SANTOS, A. C. A.; SILVA, S.; LEITE, H. G.; DA CRUZ, J. P. Influência da variabilidade edafoclimática no crescimento de clones de eucalipto no Nordeste baiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 91, p. 259-268, 2017.

SCHETTINO, S; MINETTE, L. J.; PAULO SOUZA, A. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 935-942, 2015.

SESSIONS, J. O. H. N.; BETTINGER, P. E. T. E. Hierarchical planning: pathway to the future. In: PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY SYMPOSIUM, Seattle: University of Washington Institute for Forest Resources, 2001. p. 185-190.

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

SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; DA SILVA, M. L. Influência de estimativas de produção de madeira em processos de regulação florestal utilizando programação linear. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 1, p. 57-72, 2005.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET). **Revista Árvore**, v. 29, n. 6, p. 931-936, 2005.

SILVA, G. F.; GHISOLFI, E. M.; TEIXEIRA, A. F.; CABRINI, A. M.; BARROS JÚNIOR, A. A. O método das restrições na solução de um problema de planejamento florestal multiobjetivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 1, n. 1, p. 41-48, 2006.

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

SOUZA, D. O. **Algoritmos genéticos aplicados ao planejamento do transporte principal de madeira**. Orientador: Anselmo Chaves Neto. 2004. 169 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004.

SPONHOLZ, I. K.; OLIVEIRA FILHO, P. C.; D OLIVEIRA, E. B. Espacialização da produção florestal por sortimento de madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 76, p. 369-378, 2013.

TAUBE NETTO, M. Um modelo de programação linear para planejamento de florestas de eucalipto. **Pesquisa Operacional**, v. 4, n. 1, p. 19-39, 1984.

TEIXEIRA, A. F. **Aplicação de algoritmos evolucionários na solução de problemas de planejamento florestal multiobjetivo**. 2002. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2002.

THOMPSON, E. F.; HALTERMAN, B. G.; LYON, T. J.; MILLER, R. L. Integrating timber and wildlife management planning. **The Forestry Chronicle**, v. 49, n. 6, p. 247-250, 1973.

VANZETTI, N.; BROZ, D.; MONTAGNA, J. M.; CORSANO, G. Integrated approach for the bucking and production planning problems in forest industry. **Computers & Chemical Engineering**, 2019.

WARE, G. O.; CLUTTER, J. L. A mathematical programming system for the management of industrial forests. **Forest Science**, v. 17, n. 4, p. 428-445, 1971.

WEINTRAUB, A.; CHOLAKY, A. A hierarchical approach to forest planning. **Forest Science**. v. 37, n. 2, p. 439-460, 1991.

WEINTRAUB, A. P.; EPSTEIN, R.; MURPHY, G.; MANLEY, B. The impact of environmental constraints on short term harvesting: use of planning tools and mathematical models. **Annals of Operations Research**, v. 95, n. 1-4, p. 41-66, 2000.

WERNEBURG, M. A. P. **Planejamento em grandes empresas florestais no Brasil**. Orientadora: Mayra Luiza Marques da Silva Binoti. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2015.

ZAGONEL, R. Análise ótima de estradas de uso florestal em áreas de relevo plano em povoamentos de *Pinus taeda* no Planalto Catarinense. **Scientiae Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 33-41, 2008. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr77/cap04.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2018.

## CAPÍTULO 1

### **PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO DA COLHEITA EM POVOAMENTOS FLORESTAIS NO BRASIL: ESTADO DA ARTE, DESAFIOS E FUTURAS DIREÇÕES**

**RESUMO:** A indústria brasileira de base florestal (eucalipto) apresenta a maior produtividade e a menor rotação do mundo. Os altos índices de produtividade são resultados da combinação de características edáficas, climáticas e fisiográficas e investimento contínuo em pesquisa e práticas silviculturais. Apesar da liderança mundial em termos de produtividade, o custo de produção da madeira no Brasil aumentou nos últimos anos. Além disso, o aumento da demanda e a exigência por madeira e produtos certificados, tem requerido maior eficiência no gerenciamento dos fatores de produção. Um dos maiores desafios tem sido incluir os objetivos ou restrições de ordem ambiental e social nos modelos de otimização, sem alterar significativamente os resultados econômicos (máxima receita ou mínimo custo) e com garantia de atendimento da demanda por madeira. Neste capítulo é apresentada uma visão geral do planejamento florestal brasileiro nos níveis estratégico, tático e operacional, de forma integrada e, também, as principais ferramentas utilizadas para a otimização do ordenamento da colheita florestal.

**ABSTRACT:** The Brazilian forestry industry (eucalyptus) has the highest productivity and lowest rotation in the world. High productivity rates are the result of a combination of soil, climatic and physiographic characteristics and continuous investment in silvicultural research and practices. Despite world leadership in terms of productivity, the cost of producing wood in Brazil has increased in recent years. In addition, the increase in demand and the demand for wood and certified products, has required greater efficiency in the management of the factors of production. One of the greatest challenges has been to include the environmental and social objectives or constraints in the optimization models, without significantly altering the economic results (maximum revenue or minimum cost) and guaranteeing the demand for wood. This chapter presents an overview of Brazilian forestry planning at the strategic, tactical and operational levels, in an integrated way, as well as the main tools used to optimize forest harvesting planning.

## 1 PLANEJAMENTO FLORESTAL HIERÁRQUICO

O gerenciamento de uma floresta sem um plano em mente pode ser guiado por considerações operacionais e isso pode ter consequências indesejáveis e imprevistas a longo prazo. Se a gestão da floresta não for criteriosamente pensada e preparada, as atividades implementadas no curto prazo, em geral, não produzirão o resultado desejado. O planejamento florestal é definido como a identificação antecipada das atividades a serem implementadas em determinada área (SESSIONS; BETTINGER, 2001). Como resultado, as metas estabelecidas para a gestão dos povoamentos têm maior possibilidade de serem atingidas no final do período para o qual os planos são realizados.

A organização das informações e a dependência entre diferentes níveis temporais e espaciais do processo de tomada de decisão define a hierarquia do planejamento florestal. O processo é dividido, em função do nível de abordagem e dos objetivos, em estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo) (BETTINGER et al., 2010). Pode ser acrescido, ainda, o nível imediato, que se refere ao período de um 1 dia (RÖNNQVIST, 2003), conforme Tabela 1. O detalhamento das informações e dos modelos matemáticos aumenta à medida que as tomadas de decisão se movem do nível estratégico para o operacional. Ao mesmo tempo, as incertezas que cercam a previsão obtidas por estes modelos, tornar-se progressivamente menores, à medida que as decisões avançam em direção ao nível operacional (GUNN, 2005).

Embora o planejamento seja dividido em três níveis de tomada de decisão, na prática as organizações podem não usar todos os três tipos. A maioria das empresas florestais tem desenvolvido planos estratégicos e, a partir desses resultados, utilizado várias formas de planos operacionais (BETTINGER et al., 2010). As tomadas de decisão a serem consideradas em cada nível do planejamento foram mapeadas em alguns trabalhos (MARTELL et al., 1998; RÖNNQVIST et al., 2015; WERNEBURG, 2015). Os problemas da cadeia de abastecimento se inserem nos diferentes níveis e, considerando o tipo de informação disponível, o nível de detalhe exigido e, ainda, dependendo do país e da empresa, algumas decisões podem ser deslocadas para cima ou para baixo no horizonte de planejamento (RÖNNQVIST; 2003). Na Tabela 1 são apresentados os níveis de decisão da cadeia de suprimento florestal, conforme Rönnqvist (2003) e Werneburg (2015).

Tabela 1 – Níveis de decisão da cadeia de suprimento florestal para florestas de eucalipto no Brasil

<b>Nível</b>	<b>Horizonte de Planejamento</b>	<b>Manejo Florestal e Colheita</b>	<b>Transporte e Roteamento</b>	<b>Produção</b>
Estratégico	> 7 anos	Plantio, estimativas de produção e de colheita a longo prazo	Construção e manutenção de estradas e gestão de frotas	Definição do plano de investimento
Tático	Entre 3 anos e 7 anos	Manutenção de estradas e definição e dimensionamento de equipamentos	Manutenção de estradas e definição e dimensionamento de equipamentos	Planejamento da produção anual
Operacional	Entre 12 meses e 18 meses	Agendamento de equipes e sequenciamento da colheita	Definição da área de captação, planejamento do arraste e agendamento da colheita	Dimensionamento dos lotes e agendamento da colheita e transporte
Imediato	1 dia			Controle do processo e definição de padrões de corte

Fonte: adaptada conforme Rönnqvist (2003) e Werneburg (2015).

Um problema que pode surgir quando o planejamento é dividido em níveis, é que os resultados obtidos para um nível podem ser discrepantes com os objetivos a serem alcançados em outro nível (ANDERSSON, 2005). Ao mover-se do plano em um nível mais alto para um plano de um nível mais baixo, podem ser identificadas três fontes de inconsistências entre os planos: discrepâncias espaciais devido às diferentes considerações para o agrupamento das áreas de gestão, discrepância temporais devido aos diferentes horizontes de planejamento e divergências devido aos diferentes níveis de restrição (ANDERSSON, 2005; ANDERSSON; ERIKSSON, 2007).

Uma solução ideal para um nível pode não ser eficiente se não for consistente com os resultados obtidos no outro nível (RÖNNQVIST, 2003). Um exemplo dessa inconsistência é no atendimento das metas volumétricas. Se as colheitas florestais determinadas nos níveis mais altos do planejamento não forem realizadas nas unidades operacionais repetitivamente, os planos não serão atendidos. Na modelagem de um ou mais níveis do planejamento é importante considerar a consistência entre os planos estratégico, tático e operacional. Uma abordagem integrada do planejamento possibilita a redução de soluções sub-ótimas (ANDERSSON, 2005).

O principal objetivo da integração entre os três planos é garantir que eles sejam consistentes entre si e que os resultados do planejamento estratégico possam ser implementados

de forma a viabilizar uma série de planos de curto prazo. A identificação e consideração das possíveis fontes de inconsistência na modelagem matemática do planejamento, garante que as metas estabelecidas a longo prazo estejam em conformidade com as metas definidas a curto prazo (ANDERSSON, 2005).

Vários modelos do processo de tomada de decisão, com abordagem integrada, foram desenvolvidos ao longo dos anos. De acordo com o fluxo de informação, os modelos podem ser hierárquicos ou monolíticos (OWGENO, 1995). Os hierárquicos podem ser implementados com o fluxo *Top-down* ou *bottom-up* (ANDERSSON, 2005; KANGAS et al., 2014). Os monolíticos envolvem o desenvolvimento de um modelo “grande” e abrangente, que considera as principais questões de cada nível de decisão (OWGENO, 1995). Nesse caso, diversos aspectos do problema são incorporados na estrutura matemática do modelo, tornando este muito grande e de resolução complexa (WEINTRAUB; CHOLAKY; 1991). Nos hierárquicos do tipo *Top-down*, os níveis são modelados separadamente, mas todo o sistema é projetado com as ligações entre os modelos. Nesse caso, os modelos de nível superior fazem parte das restrições dos modelos de nível inferior (ANDERSSON, 2005). Dessa forma, a informação é repassada de cima para baixo, na hierarquia do planejamento florestal. Na abordagem *bottom-up*, o nível mais detalhado do planejamento é modelado em primeiro lugar e a solução obtida é utilizada para construir o que pode ser considerado como uma solução de nível superior (KANGAS et al., 2014).

Exemplos mais recentes de abordagens integradas para modelagem do planejamento podem ser encontradas em Bettinger et al. (2005), Andersson; Eriksson (2007), Pitman et al. (2007), Beaudoin et al. (2008) e Kangas et al. (2014). No Brasil, as abordagens integradas do planejamento têm sido utilizadas principalmente com a inclusão de considerações do arranjo espacial do nível tático, nos modelos de planejamento estratégico e operacional. Nos próximos itens são apresentados alguns trabalhos publicados no Brasil envolvendo as abordagens integradas do planejamento.

## **2 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO**

Uma visão holística do planejamento ocorre no nível estratégico, no qual são indicadas ações a longo prazo, relacionadas com a localização de infraestruturas, alocação de terras, metas volumétricas, receitas e custos envolvidos, além de questões de sociais e ambientais (BETTINGER et al., 2010). O problema neste nível consiste em decidir onde, quando e o

quanto de madeira deve ser colhido anualmente, a fim de alcançar todos os objetivos do empreendimento (BUONGIORNO; GILLESS, 2003). Estas decisões em conjunto às vezes são definidas como conceito de regulação da produção florestal.

O horizonte de tempo do plano estratégico é determinado pela taxa de crescimento das árvores. Em geral é considerado um ciclo de corte e meio ou dois ciclos de corte para a definição dos planos nesse nível (CLUTTER, 1983). O ciclo de corte é o período de tempo decorrido entre o plantio da muda até a reforma completa do povoamento, com um novo plantio de mudas. Portanto, pode envolver uma ou mais rotações. No Brasil, é comum o uso de ciclos de duas ou três rotações (RODRIGUES, 1997). As previsões dos planos de longo prazo são realizadas para rotações de 5 a 8 anos em plantios de eucalipto, 10 a 15 anos para plantios de pinus e 17 a 25 anos para os plantios de teca. Assim quanto mais rápido é o crescimento do povoamento, menor é a idade de rotação de corte, e menor tende a ser o horizonte de planejamento.

A qualidade de um plano de manejo depende da qualidade e disponibilidade das informações relacionadas aos ativos florestais e do método de processamento dessas informações (BETTINGER et al., 2010). As empresas florestais de grande porte, na sua maioria, fornecem uma base de informação confiável para as projeções estratégicas. Quando o objetivo principal do empreendimento não é o produto madeireiro, e, ou, as empresas são de menor porte, as informações sobre o processo produtivo podem ser imprecisas em relação a produção total e ao detalhamento dos custos. Além disso, a seleção da alternativa de manejo para cada unidade de gestão (unidade de manejo), nesse caso, é definida em função das preferências do gestor, por meio de simulações de cenários.

As principais informações necessárias para a elaboração dos planos de longo prazo focando em um só produto são: produção diferenciada por qualidade local para plantios conduzidos em alto fuste e talhadia (projetadas anualmente até a última idade de corte), preço da madeira, demanda anual da fábrica, taxa de juros, custos relacionados a práticas silviculturais, custos de colheita (corte e baldeio), custo de transporte (frete e distância até a fábrica), custo de construção e manutenção de estradas, de aquisição e manutenção de equipamentos e custo administrativo. Essas informações são utilizadas em modelos de simulação ou de otimização.

As empresas de grande porte no Brasil utilizam sistemas de suporte a decisão para selecionar a melhor alternativa de gestão para cada unidade de manejo (WERNEBURG, 2015). Esses sistemas utilizam os modelos *I* ou *II* de planejamento florestal para a programação linear ou inteira mista, que algumas vezes são resolvidos com o emprego de métodos heurísticos como: algoritmos genéticos, *simulated annealing*, busca tabu, colônia de formigas, *grasp* e

multiagentes. Alguns exemplos de prescrições consideradas no planejamento estratégico para os plantios florestais no Brasil são: colheitas com duas idades de rotação diferentes para uma mesma unidade de manejo, com mudança do regime de alto fuste para a condução da brotação (talhadia), ou reforma, ou venda da terra (BINOTI, 2012). Em alguns casos, o plano para uma unidade de manejo pode incluir um ou dois desbastes antes da colheita final, replantio, ou venda da terra (SANTOS, 2008). Além disso, podem ser incluídas considerações sociais, de forma a manter uma geração de empregos constante em diferentes regiões e durante o horizonte de planejamento (SILVA et al., 2006; MONTE, 2012). Podem também ser considerados a madeira de pequenos produtores (fomento) para o complemento da demanda (RODE et al., 2015), e formação de corredores ecológicos para o fluxo da fauna (MOREIRA, 2008; BINOTI, 2010; GOMIDE, 2010; NASCIMENTO, 2014) e a probabilidade de perdas de produção relacionadas com efeitos de incêndios e outros sinistros (BOYCHUK; MARTELL, 1996). Assim, o desenvolvimento do suporte de decisão para o gerenciamento de florestas é previsto nos planos de longo prazo, considerando todos os critérios relevantes pelo o tomador de decisão, de forma a produzir a sustentabilidade do empreendimento.

O plano estratégico pode conter um alto grau de risco e incertezas. A projeção do crescimento de povoamentos florestais ao longo do tempo ainda não é inteiramente compreendida pelos modeladores, podendo estar sujeita a um alto grau de aleatoriedade (por exemplo: ataque de pragas, mudanças climáticas e incêndios) (BOYCHUK; MARTELL, 1996; SILVA et al., 2005). O mercado é instável e determina a variação do preço da madeira, demanda e taxa de juros (PETERNELLI et al., 2006) e a tecnologia da produção e as técnicas de colheita estão sempre em evolução (MACHADO, 2002). Essas e outras mudanças periódicas, conferem aos planos de longo prazo um alto grau de variação. Como consequência, esses planos não podem ser previstos com exatidão (PUKKALA, 1998) e devem ser sempre revistos e compatibilizados com as atividades implementadas no médio e curto prazo (NELSON, 2005). Nas empresas de grande porte o plano de longo prazo é revisado anualmente.

### **3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA O PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO FLORESTAL**

O planejamento florestal tradicional começou na Europa no século 19, com ênfase na regulação do fluxo de recursos madeireiros (MARTELL et al., 1998; KANGAS et al., 2008). Nessa época, eram utilizados os métodos clássicos de controle por área e ou volume para planejar a colheita das florestas com a mesma idade de rotação (LEUSCHNER, 1984).

A revolução computacional a partir da década de 1960 e a invenção do método simplex (DANTZIG, 1963), permitiu considerar métodos de programação matemática mais complexos para o planejamento florestal e regulação da produção. As primeiras abordagens com programação linear para a regulação da produção florestal foram sugeridas por Curtis (1962) e Nautiyal e Pearse (1967), e posteriormente categorizados por Johnson e Scheurman (1977), como Modelos tipo *I* e Modelos tipo *II*. Um outro tipo de modelo menos utilizado na literatura é o Modelo *III* proposto por Garcia (1981).

Diversos trabalhos já foram conduzidos utilizando as estruturas dos modelos tipo *I* e *II* Loucks (1964), Kidd et al. (1966), Kidd (1969), Ware e Clutter (1971). O modelo tipo *I* foi implementado pela primeira vez por Navon (1971) no *Timber Resources Allocation Method* (*Timber RAM*). Esse sistema deu origem a diversos outros sistemas usados pelo Serviço Florestal Norte-Americano, cabendo citar o FORPLAN (IVERSON; ALSTON, 1986) e o SPECTRUM (ESTADOS UNIDOS, 1999).

No Brasil as primeiras publicações sobre o uso da programação linear (PL) para o planejamento florestal surgiram na década de 1980, com Taube Netto (1984); Rodriguez e Lima (1985); Rodriguez (1989); Rodrigues e Moreira (1989); Rodriguez e Martini (1989) e Carnieri (1989). Nesta década, Taube Netto desenvolveu o PLANFLOR (Sistema de Planejamento Florestal de Longo Prazo), utilizando o modelo tipo *I* para o manejo ótimo de florestas brasileiras. A última versão desse sistema foi desenvolvida em 1997. Os modelos e sistemas de suporte a decisão para o planejamento florestal se baseiam até hoje nas formulações matemáticas propostas por Curtis (1962) e Nautiyal e Pearse (1967). O modelo *III* tem sido o menos abordado na literatura e foi utilizado nos trabalhos de Reed e Errico (1986), Gunn e Rai (1987) e Ogweno (1995) entre outros.

Na estrutura proposta por Curtis (1962), em cada período de tempo uma fração da área pré-identificada é cortada e imediatamente regenerada. A cada fração da área são associadas diferentes alternativas de manejo, ou prescrições. Essas alternativas são sequências preestabelecidas de ações que ocorrerão ao longo do horizonte de planejamento (ou período de transição). A alternativa ótima para cada fração de área é escolhida considerando um conjunto de restrições, utilizando o método simplex ou uma metaheurística.

No modelo tipo *II*, o horizonte de planejamento também é dividido em períodos de colheita, a floresta é dividida em unidades de corte e os regimes de manejo são identificados (LEUSCHNER, 1984). A principal diferença entre as duas abordagens é como as unidades de corte são identificadas (DYKSTRA, 1984). No modelo *I*, as unidades são tratadas como frações de área. Isso permite a identificação destas ao longo do horizonte de planejamento (período de

transição). Nessa abordagem, a alternativa de manejo definida a uma dada fração de área permanecerá nessa durante todo o horizonte de planejamento. No modelo *II*, as unidades de corte são tratadas como classes de idade e o modelo permite que áreas distintas, colhidas e regeneradas em um mesmo período no horizonte de planejamento sejam reagrupadas em novas unidades de corte. A identidade da unidade de manejo, nesse caso, não é preservada ao longo do horizonte de planejamento.

O modelo *II* é robusto quanto ao período de regeneração da área cortada, podendo essa ocorrer em qualquer período do horizonte de planejamento. A estrutura desse modelo permite que a área ao invés de ser colhida ou regenerada possa ser programada para qualquer outra atividade de interesse do gestor, durante o horizonte de planejamento. Nessa abordagem há um maior controle em relação a quantidade de área por classe de idade no estoque ao final (DYKSTRA, 1984).

Uma diferença importante entre as duas abordagens, é que o modelo *I* permite gerar alternativas de manejo específicas por classe de capacidade produtiva. Nos casos em que a produtividade da unidade de manejo é baixa, a alternativa de condução da brotação (talhadia) para a segunda rotação pode ser limitada, ficando somente as alternativas de reforma ou venda da terra (Tabela 1). Já no modelo *II*, esta identificação não é válida, uma vez que dentro de cada classe de idade são agrupadas unidades de manejo de diferentes classes de local. Nesse caso recomenda-se o agrupamento de unidades equiprodutivas dentro de cada classe de idade (RODRIGUES, 1997).

O Modelo *III*, tem uma estrutura muito similar ao modelo tipo *II*, sendo o menos comum na literatura (GARCIA, 1990). Ambos os modelos agrupam as unidades de manejo nas *i* classes de idade iniciais presentes na floresta (GUNN, 2009). A formulação do modelo *III*, é mais robusto que o modelo *II*, pois permite diferenciar as unidades de manejo dentro das classes de idade em diferentes classes produtivas (índice de local) e tipos de culturas (DAVIS et al., 2001 citado por GUNN, 2009). Dessa maneira, as áreas com diferentes tipos de culturas dentro da mesma classe de idade, podem ser colhidas e regeneradas imediatamente ou em qualquer período do horizonte do planejamento, com o mesmo tipo de cultura. A área residual que não foi cortada passa para a próxima classe de idade. Há também a possibilidade de a área colhida com um tipo de cultura ser transferida para a área com outro tipo de cultura na mesma de idade (GARCIA, 1981).

As alternativas de manejo (prescrições) geradas para os modelos tipo *I* e *II* são definidas para cada unidade de corte ao longo do horizonte de planejamento conforme as Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Esquema para gerar as alternativas de manejo em planilhas considerando estrutura do modelo I

Modelo I															
Qualidade Local	Regime de Manejo (j)	Talhão Xi	Área (ha)	Idades de Corte (k)	Idade Atual	Horizonte de Planejamento (H)							Idade Residual (h)	Prescrição	
						0	1	2	3	4	5	6			7
Alta	AFAF	T1	A1	5-5	5	X	1	2	3	4	X	1	2	2	X11
Alta	AFAF	T1	A1	5-6	5	X	1	2	3	4	5	X	1	1	X12
Alta	AFAF	T1	A1	6-5	5	5	X	1	2	3	4	X	1	1	X13
Alta	AFAF	T1	A1	6-6	5	5	X	1	2	3	4	5	X	0	X14
Alta	AFTA	T1	A1	5-5	5	X	1	2	3	4	X	1	2	2	X15
Alta	AFTA	T1	A1	5-6	5	X	1	2	3	4	5	X	1	1	X16
Alta	AFTA	T1	A1	6-5	5	5	X	1	2	3	4	X	1	1	X17
Alta	AFTA	T1	A1	6-6	5	5	X	1	2	3	4	5	X	0	X18
Alta	AFAF	T2	A2	5-5	2	2	3	4	X	1	2	3	4	4	X21
Alta	AFAF	T2	A2	6	2	2	3	4	5	X	1	2	3	3	X22
Alta	AFTA	T2	A2	5-5	2	2	3	4	X	1	2	3	4	4	X23
Alta	AFTA	T2	A2	6	2	2	3	4	5	X	1	2	3	3	X24
Média	AFAF	T3	A3	5	3	3	4	X	1	2	3	4	X	0	X31
Média	AFAF	T3	A3	6	3	3	4	5	X	1	2	3	4	4	X32
Média	AFTA	T3	A3	5	3	3	4	X	1	2	3	4	X	0	X33
Média	AFTA	T3	A3	6	3	3	4	5	X	1	2	3	4	4	X34
Média	AFAF	T4	A4	5	1	1	2	3	4	X	1	2	3	3	X41
Média	AFAF	T4	A4	6	1	1	2	3	4	5	X	1	2	2	X42
Média	AFTA	T4	A4	5	1	1	2	3	4	X	1	2	3	3	X43
Média	AFTA	T4	A4	6	1	1	2	3	4	5	X	1	2	2	X44
Média	AFAF	T5	A5	5-5	4	4	X	1	2	3	4	X	1	1	X51
Média	AFAF	T5	A5	5-6	4	4	X	1	2	3	4	5	X	0	X52
Média	AFAF	T5	A5	6-5	4	4	5	X	1	2	3	4	X	0	X53
Média	AFTA	T5	A5	5-5	4	4	X	1	2	3	4	X	1	1	X51
Média	AFTA	T5	A5	5-6	4	4	X	1	2	3	4	5	X	0	X52
Média	AFTA	T5	A5	6-5	4	4	5	X	1	2	3	4	X	0	X53
Baixa	AFAF	T6	A6	6-5	6	X	1	2	3	4	X	1	2	2	X61
Baixa	AFAF	T6	A6	6-5	6	X	1	2	3	4	X	1	2	2	X62
Baixa	AFAF	T7	A7	5	1	1	2	3	4	X	1	2	3	3	X71
Baixa	AFAF	T7	A7	6	1	1	2	3	4	5	X	1	2	2	X72
Baixa	AFAF	T7	A7	5	1	1	2	3	4	X	1	2	3	3	X73
Baixa	AFAF	T8	A8	5	3	3	4	X	1	2	3	4	X	0	X81
Baixa	AFAF	T8	A8	6	3	3	4	5	X	1	2	3	4	4	X82
Baixa	AFAF	T8	A8	5	3	3	4	X	1	2	3	4	X	0	X83
Baixa	AFAF	T8	A8	6	3	3	4	5	X	1	2	3	4	4	X84

Tabela 3 – Esquema para gerar as alternativas de manejo em planilhas considerando a estrutura do modelo II

Regime de Manejo (j)	Classe de Idade Xi	Área (ha)	Idades de Corte (k)	Regeneração (q)	Modelo II								Idade Residual (h)	Prescrição
					Horizonte de Planejamento (H)									
					0	1	2	3	4	5	6	7		
AFAF	-5	A-5	5-5	5	X	-1*	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-2*	-2	X11
AFAF	-5	A-5	5-6	6	X	-2*	-2*	-3*	-4*	-5*	X	-1*	-1	X12
AFAF	-5	A-5	6-5	5	-5	X	-2*	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-1	X13
AFAF	-5	A-5	6-6	6	-5	X	-2*	-2*	-3*	-4*	-5*	X	0	X14
AFTA	-5	A-5	5-5	5	X	-2*	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-2*	-2	X15
AFTA	-5	A-5	5-6	6	X	-2*	-2*	-3*	-4*	-5*	X	-1*	-1	X16
AFTA	-5	A-5	6-5	5	-5	X	-1*	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-1	X17
AFTA	-5	A-5	6-6	6	-5	X	-2*	-2*	-3*	-4*	-5*	X	0	X18
AFAF	-2	A2	5-5	5	-2	-3*	-4*	X	-1*	-2*	-3*	-4*	-4	X21
AFAF	-2	A2	6	6	-2	-3*	-4*	-5*	X	-1*	-2*	-3*	-3	X22
AFTA	-2	A2	5-5	5	-2	-3*	-4*	X	-1*	-2*	-3*	-4*	-4	X23
AFTA	-2	A2	6	6	-2	-3*	-4*	-5*	X	-1*	-2*	-3*	-3	X24
AFAF	-3	A3	5	5	-3	-4*	X	-2*	-2*	-3*	-4*	X	0	X31
AFAF	-3	A3	6	6	-3	-4*	-5*	X	-1*	-2*	-3*	-4*	-4	X32
AFTA	-3	A3	5	5	-3	-4*	X	1*	-2*	-3*	-4*	X	0	X33
AFTA	-3	A3	6	6	-3	-4*	-5*	X	-1*	-2*	-3*	-4*	-4	X34
AFAF	-1	A4	5	5	-1	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-2*	-3*	-3	X41
AFAF	-1	A4	6	6	-1	-2*	-3*	-4*	-5*	X	-1*	-2*	-2	X42
AFTA	-1	A4	5	5	-1	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-2*	-3*	-3	X43
AFTA	-1	A4	6	6	-1	-2*	-3*	-4*	-5*	X	-1*	-2*	-2	X44
AFAF	-4	A5	5-5	5	-4	X	-1*	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-1	X51
AFAF	-4	A5	5-6	6	-4	X	-1*	-2*	-3*	-4*	-5*	X	0	X52
AFAF	-4	A5	6-5	5	-4	-5*	X	-1*	-2*	-3*	-4*	X	0	X53
AFTA	-4	A5	5-5	5	-4	X	-1*	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-1	X54
AFTA	-4	A5	5-6	6	-4	X	-1*	-2*	-3*	-4*	-5*	X	0	X55
AFTA	-4	A5	6-5	5	-4	-5*	X	-1*	-2*	-3*	-4*	X	0	X56
AFAF	-6	A6	6-5	5	X	-1*	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-2*	-2	X61
AFAF	-6	A6	6-5	5	X	-1*	-2*	-3*	-4*	X	-1*	-2*	-2	X62

\* Representa a regeneração do plantio imediatamente após a colheita ( $q=k'$ ). \*\*j - pode ser igual a um j' que representa a programação de outra atividade diferente de colheita e regeneração. Exemplo: para corte na idade  $k=0$ ; a soma sobre a classe de idade  $M=-5$ , vai de -5 a -2. Assim no final do horizonte de planejamento a classe de idade muda para -2.

O modelo *II*, por ser mais robusto tem sido o mais utilizado nos sistemas de suporte a decisão florestal. A fórmula matemática dos dois modelos é apresentada a seguir, com a regeneração da área após o corte, conforme Dykstra (1984). Outras abordagens mais completas, ou seja, que permitem inclusão de mais alternativas de manejo com a estrutura do modelo *II* são encontradas em Johnson e Scheurman (1977). A estrutura matemática para o modelo *III* pode ser verificada em Garcia (1981).

$$\text{Modelo I - Max ou Min } Z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=0}^{H-1} c_{ijk} x_{ij} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\{i = 1, 2, \dots, M\}, \{j = 1, 2, \dots, N\} \text{ e } \{k = 0, 1, 2, \dots, H - 1\}$$

$$\text{Modelo II - Max ou Min } Z = \sum_{i=-m}^{k-p} \sum_{j=1}^N \sum_{k=0}^{H-1} c_{ijk} x_{ij} + \sum_{i'=-r}^{H-1} \sum_{j'=1}^N d_{i'j'qH} w_{i'j'H} \quad (\text{eq. 2})$$

$$\{i = -M, -M + 1, \dots, 0, 1, 2, \dots, H - 1\}, \{j = 1, 2, \dots, N\}, \{k = 0, 1, 2, \dots, H - 1\} \text{ e } \{q = k, k + 1, \dots, H - 1\}$$

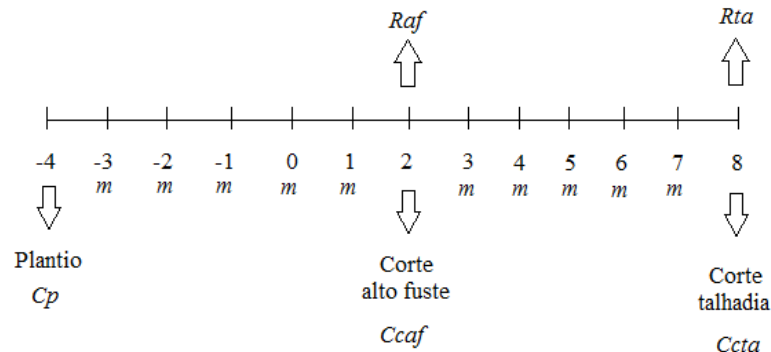
A variável de decisão no caso do modelo *I* é referente a fração da área  $x$  (ha) da  $i$ -ésima unidade de colheita, associado à  $j$ -ésima prescrição, com a colheita programada para o início do período  $k$ . No modelo *II*, a variável de decisão incide sobre a fração área  $x$  (ha) regenerada na  $i$ -ésima classe de idade, em  $j$ -ésima prescrição, com a colheita programada no início do período  $k$ . A robustez do modelo *II* é determinada pela variável de decisão  $w_{i'j'H}$ , que é a área no início do período  $q$  com classe de idade  $i$ , regenerada sobre a prescrição  $j'$  (podendo ser ou não  $j' \neq j$ ), deixada estoque no final do horizonte de planejamento ( $H$ ). Ao considerar a regeneração imediatamente após último período de corte  $k'$ , a nova classe de idade da área  $w_{i'}$ , ao final do plano de manejo será igual a  $h=k'+1-H$ , sendo  $h$  a idade da floresta residual. Em que  $p$  é a idade mínima de colheita.

O coeficiente técnico  $c$  é algum fator de produção por hectare, da unidade de corte  $i$  associado a prescrição  $j$ , com o corte no início do período  $k$ . O coeficiente técnico  $d$  é algum fator de produção por hectare da classe de idade  $i$  deixada pra regenerar no período  $q$  após o corte no período  $k$ , associada a prescrição  $j'$ . Podem ser considerados como valores de  $c$  e  $d$  o valor anual equivalente ( $VAE$ ), o valor presente líquido ( $VPL^\infty$ ), o valor de expectativa da terra, o custo médio de produção, a produção total, o custo total de produção ou qualquer método de avaliação que permita a comparação de projetos com diferentes durações no tempo

(NAUTIYAL, 1988; REZENDE; OLIVEIRA, 2001). Os critérios de avaliação são definidos em função dos objetivos do tomador de decisão.

Os valores monetários para os coeficientes técnicos são calculados a partir do fluxo de caixa. As receitas por hectare das frações de áreas são obtidas para cada  $k$  período da colheita, associado a determinada prescrição. Os custos de produção são contabilizados em cada ano de ocorrência no fluxo de caixa até o ano da colheita considerando cada regime. Os cálculos são feitos para todas as rotações, durante o horizonte de planejamento. Tanto a receita, quanto os custos são descapitalizados, ou capitalizados, dependendo do ano em que ocorrem no fluxo de caixa, utilizando uma taxa de desconto fixa para o ano zero do horizonte de planejamento. No exemplo a seguir, é apresentado o esquema do fluxo de caixa para um ciclo considerando duas rotações referentes a possível prescrição gerada pelo Modelo *I*. A idade dos povoamentos já estabelecidos varia de  $-m$ ,  $-m+1$ , ...,  $0$ , e depois do ano  $0$ ,  $m+1$ ,  $m+2$ , ...,  $H-1$ . A idade dos povoamentos a serem implantados varia de  $0$ , ...,  $H-1$ .

Ciclo com duas rotações: idade atual de 4 anos e primeira rotação programada para 6 anos, com condução da brotação para a segunda rotação e corte final programado para uma rotação de 6 anos, resultando em um ciclo de 12 anos.



em que  $C_c$  é o custo de produção no conduzido em alto fuste ( $C_{caf}$ ) ou talhadia ( $C_{cta}$ ), ocorrendo no final do ano, desde o ano zero até o último ano do horizonte de planejamento para a unidade de corte  $i$  associado a prescrição  $j$ , e  $R$  ( $R_{af}$  ou  $R_{ta}$ ) é a receita gerada com o corte no final no  $k$  ano do horizonte de planejamento. Para calcular o valor atual das parcelas, é importante considerar se o pagamento ocorre no final ou no início de cada período. O custo de plantio no exemplo, ocorre no início do período, neste caso o valor deve ser capitalizado considerando 4 períodos para tornar o valor equivalente ao ano 0. Se a parcelas ocorressem no final do período de plantio, a capitalização seria para três períodos até o ano zero, pois, a taxa de juros não incide sobre a parcela inicial nesse caso.

A alta taxa de produção anual dos povoamentos florestais no Brasil, combinada com a alta taxa de juros, torna necessário a correção dos valores monetários para rotações constantes. Tanto o VAE quanto o  $VPL_{\infty}$  são adequados para comparar projetos com durações diferentes (SILVA; FONTES, 2005). A diferença entre os dois critérios está na duração do projeto. O valor anual equivalente considera que a duração do projeto é o horizonte de planejamento ( $n=H$ ). A fórmula considerando o VAE como critério, com a primeira parcela ocorrendo no final de cada período, é:

$$VAE = \frac{VPL[(1+i)^t - 1](1+i)^{nt}}{(1+i)^{nt} - 1} \quad (\text{eq. 3})$$

em que:  $n$  é duração do projeto (anos para os planos estratégicos),  $t$  é o período de capitalização, e  $i$  é a taxa de desconto.

As restrições clássicas para os planos de regulação florestal são: área disponível para colheita, fluxo de volume constante e regulação sobre a estrutura de idades na floresta (DYKSTRA, 1984). Essas restrições são apresentadas a seguir para os modelos *I* e *II*:

### **3.1 Restrição de área disponível para colheita**

Modelo *I*: a restrição é imposta de forma que a soma das áreas de todas as prescrições geradas para essa unidade de colheita  $i$ , deva ser igual a área total  $A_i$  dessa mesma unidade. Assim somente uma prescrição é escolhida para determinada fração da área.

Modelo *II*: a flexibilidade deste modelo na programação das atividades ao longo do horizonte de planejamento faz com que seja necessário um maior controle sobre as áreas colhidas e regeneradas. Nesta abordagem, há dois tipos de restrição de área que devem ser atendidas. A primeira (Equação 5) refere-se as áreas disponíveis a serem implantadas e assegura que os hectares colhidos no ano  $k$ , a partir de cada classe de idade  $i$  presente no ano zero, somados aos hectares deixados para o estoque dessa mesma classe idade  $i$ , deve ser igual ao total de hectares  $A_i$ . A segunda restrição (equação 6), refere-se as áreas regeneradas e cortadas durante o horizonte de planejamento (RODRIGUES, 1997). Essa restrição assume que a soma das áreas cortadas no início do período  $t$  (oriundas de áreas regeneradas no início do período  $k$ ), mais as áreas regeneradas no início do período  $k$  e deixadas como estoque, é igual à soma de todas as áreas  $i$  no início do período  $k$ . A fração de área cortada, neste caso, é imediatamente regenerada.

$$\text{Modelo I} \quad \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} = A_i \text{ (eq.4)}$$

$$\text{Modelo II} \quad \sum_{k=0}^{H-1} x_{ik} + w_{iH} = A_i \text{ (eq.5)}$$

$$\text{Modelo II} \quad \sum_{t=k+p}^{H-1} x_{tk} + w_{kH} = \sum_{i=-M}^{k-p} x_{it} \text{ (eq.6)}$$

em que

Modelo I:  $A_i$  = área do  $i$ -ésimo estrato  $\{i = 1, 2, \dots, M\}$  e  $j$  = prescrição  $\{j = 1, 2, \dots, N\}$

Modelo II:  $A_i$  = área da  $i$ -ésima classe de idade presente na estrutura inicial da floresta  $\{i = -M, -M + 1, \dots, 0, 1, 2, \dots, H - 1\}$  e  $k$  = período de colheita  $\{k = 1, 2, \dots, H - 1\}$ .

### 3.2 Restrição para fluxo anual de madeira

Esta restrição permite manter os níveis de colheita constantes, de forma a atender uma demanda por madeira pré-estabelecida pelo gestor. Para isso, são definidos os limites superiores e inferiores de produção para cada ano do horizonte de planejamento. O volume colhido pode variar entre esses níveis de tolerância ( $\alpha$  e  $\beta$ ), em cada período do plano. As restrições de volume são definidas da mesma forma para os modelos I e II. As restrições de demanda são apresentadas considerando as  $i$  unidades de colheita do modelo I:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ijk+1} x_{ij} \geq (1 - \alpha) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ijk} x_{ij} \quad (\text{eq. 7})$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ijk+1} x_{ij} \leq (1 + \beta) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ijk} x_{ij} \quad (\text{eq. 8})$$

$\{k = 0, 1, \dots, H - 2\}$ ,  $i$ -ésimo estrato no modelo I  $\{i = 1, 2, \dots, M\}$  ou  $i$ -ésima classe de idade no modelo II  $\{i = -M, -M + 1, \dots, 0, 1, 2, \dots, H - 1\}$

em que

$v_{ijk}$  = é o volume ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) produzido pela  $i$ -ésima unidade de colheita na  $j$ -ésima prescrição, no período de corte  $k$ .

$\alpha$  e  $\beta$  = é a fração máxima e mínima de redução do nível de colheita permitida a partir do período  $k$  para o período  $k+1$ .

Considerando que  $v_{ijk} = v_{kH}$  é o total de volume ( $m^3$ ) removido no período  $k$ , e que esse volume é igual a demanda  $D$  ( $m^3$ ) necessária para suprir a fábrica ou o mercado, as equações 7 e 8 podem ser escritas assim:

$$v_{H(k+1)} \geq (1 - \alpha)v_{Hk} = (1 - \alpha) D \quad (\text{eq. 9})$$

$$v_{H(k+1)} \leq (1 + \beta)v_{Hk} = (1 + \beta) D \quad (\text{eq. 10})$$

### 3.3 Restrição para regulação produção

A restrição de regulação limita que a soma das áreas residuais em determinada classe de idade  $h$ , associada a prescrição  $j$ , seja igual a razão a área total nesse mesmo regime ( $A_j$ ) dividida pela quantidade de classes idade ( $NC$ ), a serem manejadas após a período de transição. Essa quantidade de classes é a idade de rotação regulatória. Para a regulação da produção, a idade  $NC$  deve coincidir com a idade ótima de corte (RODRIGUES, 1997).

$$\text{O número de classe de idade (NC) é: } NC = \frac{R}{IC} \quad (\text{eq. 11})$$

A fração de área para cada classe de idade  $F_j$  do regime de manejo  $j$  é dada por:

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij}}{NC} \quad (\text{eq. 12})$$

Então, a restrição de regulação de área para cada regime de manejo é assim definida:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ijh} = F_j \quad \{h=1,2,3,\dots, NC\} \quad (\text{eq. 13})$$

em que

$R$  = idade de rotação ótima, geralmente definida com base em critérios econômicos.

$NC$  = número de classes de idade a serem manejadas após o período de transição,

$IC$  = intervalo de tempo entre cortes, no Brasil  $IC = 1$ .

$F_j$  = área do  $i$ -ésimo estrato manejado sobre a  $j$ -ésima prescrição cortadas e regeneradas anualmente;

$A_{ij}$  = área de cada  $i$ -ésimo estrato, na  $j$ -ésima prescrição;

$x_{ijh}$  = área do  $i$ -ésimo estrato manejado sobre a  $j$ -ésima prescrição, cujas os estoques remanescentes terão  $h$  períodos (anos) de idade ao final do período de transição.

### 3.4 Controle de corte e plantio anual

Para cada período de colheita  $k$  é programada uma soma de frações dos estratos  $i$  associados às prescrições  $j$  para serem colhidos. Essa soma em todo o  $k$  período tem que ser igual a um limite estabelecido pelo gestor. Se a soma das frações de área dos estratos a serem colhidas no período  $k$  for associada a uma determinada prescrição  $j$ , por exemplo reforma após a colheita ( $AC_k =$  área ser reformada). Essa restrição impõe que determinada quantidade das frações de áreas colhidas no período  $k$  sejam imediatamente reformadas após o corte. Da mesma forma que no controle do fluxo de volume, no controle da área podem ser estabelecidos os limites mínimo e máximo, de maneira que a quantidade de área cortada possa variar entre esses níveis de tolerância. As restrições para o controle de área são definidas da mesma forma para os modelos *I* e *II*:

$$AC_k = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_k x_{ij} \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (\text{eq. 14})$$

No período em que é estabelecido a restrição de regulação:

$$AC_k = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} = F_j \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (\text{eq. 15})$$

em que

$AC_k =$  área de corte anual no período  $k$ ,

$x_{ij} =$  área do  $i$ -ésimo estrato prescrito pela  $j$ -ésima prescrição que apresentam produções ou cortes no período  $k$ .

A variável de decisão nos modelos de programação linear pode assumir qualquer valor real não-negativo, inteiro ou fracionário (HILLIER; LIEBERMAN, 1980). Quando a unidade de manejo é o talhão (ou quadra), apenas valores inteiros podem ser assumidos, resultando em uma variável binária (0 ou 1 para não cortar e cortar, respectivamente). Uma solução prática nesse caso, utilizada em algumas empresas florestais, consiste no arredondamento das variáveis (SILVA et al., 2003). Outra abordagem, mais eficiente, é o emprego de programação linear inteira mista. Entretanto, quando o número de talhões e de prescrições resulta em um modelo de grande porte, ao invés de um algoritmo de programação matemática (*Branch and Bound* ou *cutting plane*), pode ser necessário utilizar uma metaheurística para resolver o modelo (RODRIGUES, 2001; BETTINGER et al., 2010). Na equação 17, é apresentada a restrição de integridade da área da unidade de manejo para o modelo tipo I. Um exemplo deste tipo de

restrição para o modelo II é apresentado em Banhara et al. (2010). A soma das frações de área da *i-ésima* unidade de área no *j-ésimo* no regime de manejo:

- Modelo I

$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_k x_{ij} \leq 1$  (eq.17), em que  $a_k = 1$  se  $x_{ij}$  apresenta colheita no período  $k$ ; 0 caso contrário.

A maior parte dos modelos de planejamento florestal têm como único objetivo a maximização da receita líquida ou minimização do custo, com garantia de fluxo madeireiro constante suficiente e, em certos casos, a regulação da produção. Recentemente, abordagens sociais e ambientais têm sido inseridas nos modelos de regulação florestal, seja por meio de restrições ou de multicritérios. Esta necessidade tem relação direta com os princípios básicos da certificação e com o conceito de sustentabilidade (econômica, ambiental e social) (AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION, 2016). A incorporação de questões ambientais e sociais nos modelos matemáticos se constituem em um dos campos de fronteira do conhecimento internacional do planejamento sustentável (BETTINGER; CHUNG, 2004). Mas, estudos nesse sentido para povoamentos com espécies de rápido crescimento ainda são incipientes (SILVA et al., 2006).

Nos itens subsequentes são descritos os principais avanços ocorrido nos últimos anos na modelagem matemática para problemas estratégicos de plantios florestais no Brasil:

### **3.5 Inclusão de critérios sociais**

Abordagens sociais podem ser incluídas nos modelos de planejamento estratégico, sem gerar impactos na receita líquida e no atendimento da demanda (MONTE, 2012). Uma forma de incluir esse critério é considerar a estratificação da área e volume por município. O modelo matemático tipo I foi modificado por Monte (2012), de forma que as prescrições de colheita fossem geradas para cada  $p$  município, da seguinte forma:  $\max Z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^P c_{ijkp} x_{ijp}$   $\{p = 1, 2, \dots, P\}$ . O autor considerou como restrições o controle por volume para cada município e, em cada período de colheita do horizonte de planejamento (equações 18 e 19). Além disso foi considerada a restrição de estratificação espacial por município, que permitiu regular a floresta ao final do período de transição (equações 20 e 21). Essa regulação garante que as operações florestais ocorram anualmente em cada local. Outras considerações nesse trabalho foram a doação de árvores de menor porte para comunidade e antecipação da regulação florestal. Nas equações são apresentadas as formulações das restrições por compartimento:

Volume por compartimento: cada compartimento  $p$  deve suprir uma quantidade de demanda anual. O volume disponível por estrato é determinado pelo volume médio ponderada pelas áreas das unidades de manejo  $i$  dentro de cada compartimento  $p$ , a ser obtido no período de corte  $k$ . A partir do volume total dos compartimentos, é determinado a contribuição em porcentagem  $d$  de cada estrato  $p$  para suprir a demanda de madeira em cada  $k$  período de corte.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ijpk} x_{ijp} \geq d_{pk}(1 - \alpha) D_{pk} \quad (\text{eq. 18})$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ijpk} x_{ijp} \leq d_{pk}(1 + \beta) D_{pk} \quad (\text{eq. 19})$$

em que

$v_{ijpk}$  = é o volume, em  $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ , produzido pela  $i$ -ésima unidade de colheita na  $j$ -ésima prescrição no  $p$ -ésimo compartimento, no período de corte  $k$ .

$d_{pk}$  = é a porcentagem de participação da demanda de cada compartimento  $p$  no período  $k$ .

As demais variáveis foram indexadas nas equações 7, 8, 9, e 10.

Regulação florestal por compartimento: O número de classes de idades é definido conforme a equação 11. Após isso, é determinada a fração de área residual para cada classe de idade  $F_{pj}$  do compartimento  $p$  sobre o regime de manejo  $j$  dada pela seguinte equação:

$$F_{pj} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ijp}}{NC}, \quad \{p = 1, 2, \dots, P\} \quad (\text{eq. 20})$$

A restrição de regulação da área para cada compartimento  $c$  e regime de manejo  $j$  é definida conforme abaixo:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ijph} = F_{pj} \quad \{h=1, 2, 3, \dots, NC\}. \quad (\text{eq. 21})$$

As variáveis foram indexadas nas equações 11, 12 e 13.

]As empresas florestais de grande porte têm utilizado a madeira de fomento florestal para completo da demanda anual. Essa madeira proveniente de plantios de pequenos e médios proprietários promove ganho socioeconômico das comunidades regionais. Para um melhor controle do fluxo de madeira da empresa, é necessário considerar as áreas de fomentadas nos planos estratégicos otimizados. Isso garante maior estabilidade na oferta da madeira, e

renovação constante dos contratos (RODE et al., 2015). A regulação dos plantios do fomento pode ser feita em conjunto com os plantios próprios, ou pode ser gerado um plano para cada tipo área. No caso do planejamento em conjunto, da mesma forma que no trabalho de Monte (2012), a restrição de regulação deve ser estabelecida separadamente por compartimento, ou tipo de plantio (RODE et al., 2015). Assim é possível garantir que sejam colhidas  $i$  unidades de manejo dos plantios fomentados e próprios anualmente, e que após o período de transição seja obtido uma floresta regulada.

A inclusão de quantidade mão de obra em modelos estratégicos de múltiplos objetivos é considerada como um ganho social para empresa. Esse tipo de abordagem garante o fluxo regular de empregados com custo mínimo, ou retorno máximo, dentro do horizonte de planejamento. Silva et al. (2006), formulou um problema de multicritérios com a estrutura do modelo tipo I, considerando os seguintes objetivos: maximização do lucro, maximização da mão de obra e minimização dos desvios de demanda. O autor maximizou a quantidade de mão de obra considerando a que soma da mão de obra (unidade.ha<sup>-1</sup>) utilizada pela  $j$ -ésima prescrição na  $i$ -ésima unidade de manejo ( $mb_{ij}$ ) fosse menor ou igual a mão-de-obra total disponível durante todo o período de planejamento (un.) ( $mo$ ). A restrição formulada foi:  $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N mb_{ij} \leq mo$ . Para resolver o problema, foi considerado um conjunto de soluções ao longo da fronteira Pareto-ótima (Método das Restrições). Esse método permitiu encontrar uma solução próxima à fronteira entre os objetivos conflitantes. Outros trabalhos como o de Teixeira (2002) e Pereira (2004) e utilizaram métodos heurísticos para resolver o problema de multicritérios.

### **3.6 Manejo do espaço e da paisagem**

O manejo do espaço e da paisagem tem sido as abordagens mais discutidas internacionalmente (BETTINGER; CHUNG, 2004). O enfoque dos estudos tem sido no problema de conectividade entre fragmentos de floresta nativa e plantios florestais, e na adjacência entre as unidades de manejo (MOREIRA, 2008). Os desafios desses estudos, têm sido desenvolver técnicas que integrem a redução dos impactos das atividades de colheita, aos objetivos econômicos do empreendimento (MOREIRA; RODRIGUEZ, 2010).

Para incorporar o manejo da paisagem no processo do planejamento estratégico, é necessário considerar o efeito das relações espaciais entre as unidades de gestão. Na maioria das vezes o arranjo espacial destas unidades é considerado nos níveis mais baixos do planejamento, em função do custo de colheita, transporte, construção e manutenção de estradas,

e aspectos ambientais e sociais (MARTELL et al., 1998; BASKENT; KELES, 2005). A inclusão da espacialidade na formulação matemática dos modelos de planejamento estratégico permite analisar o efeito de restrições ambientais nos objetivos maiores do empreendimento (SANTANA, 2015).

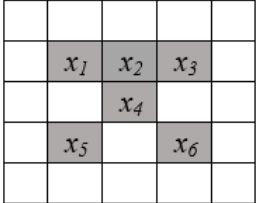
Os modelos estratégicos com restrições espaciais incluem variáveis inteiras ou binárias, que se associam a problemas de natureza combinatória, de difícil solução por meio da programação linear inteira. Em muitos casos essas soluções por meio de técnicas exatas podem levar horas ou até dias para serem solucionadas (McDILL; BRAZE, 2000). Embora em muitos casos tenham solução com os métodos exatos, o tamanho dos modelos com considerações espaciais pode tornar inviável por meio desses, sendo necessário, o uso de simulação, heurísticas ou programação dinâmica (BETTINGER; CHUNG, 2004; BASKENT; KELES, 2005).

As restrições de adjacência definem os limites máximos de unidades de colheita e os períodos de tempo, em que as unidades adjacentes não podem ser colhidas, limitando o corte de áreas contíguas (BARRETT; GILLESS, 2000). Existem diversas formulações deste tipo de restrição, e são definidas como modelos restritos por área (MRA) ou modelos restritos por unidade (MRU) (MURRAY, 1999). Os modelos restritos por unidades (MRU), considera que a unidade de corte é grande o suficiente para não permitir as atividades de colheita nas unidades adjacentes. O MRU pode formulado como um problema de programação inteira ou inteira mista, quando envolve poucas variáveis de decisão (BASKENT; KELES, 2005). Por outro lado, nos modelos restritos por área (MRA), a colheita nas unidades adjacentes é permitida sob a condição que a área total das unidades colhidas deve permanecer menor que o limite da restrição espacial (MURRAY, 1999). O MRA é modelado como um problema de programação dinâmica devido à forma não-linear da restrição de área (BASKENT; KELES, 2005).

No Brasil, a inclusão do manejo da paisagem nos modelos de planejamento estratégico tem sido recentemente estudada na literatura. Castro (2007) utilizou o modelo I, com o objetivo de maximizar o valor presente global, considerando as restrições de área e controle de corte pelo volume anual. O autor incluiu a restrição matriz de adjacência ordinária do tipo MRU no modelo clássico do planejamento estratégico. Na Tabela 4, é apresentada a estrutura da restrição Matriz de adjacência ordinária. Para a formulação da restrição espacial foi necessário a identificação dos vizinhos de cada unidade de colheita para compor a matriz. O número  $M$  de linhas e colunas da matriz é definido pela quantidade de unidades de manejo. Nessa restrição é determinado que se os talhões  $i$  e  $i'$  são adjacentes, os elementos que compõe a matriz ( $x_{ii'}$ )

recebem o valor igual a 1. Os elementos na diagonal ( $x_{ii}$ ) recebem o valor 0. O problema foi resolvido pelo método exato da programação linear binária.

Tabela 4 – Restrição Matriz de adjacência ordinária. a) Representação das unidades de manejo com adjacência nas arestas. b) Formulação matemática. c) Exemplo da restrição

a) Unidades de colheita	b) Formulação matemática	c) Exemplo
	$n_i x_{ik} \sum_{i' \in \text{adj}_i} x_{i'k} \leq n_i$	$2x_1 + x_2 + x_4 \leq 2$ $x_1 + 3x_2 + x_3 + x_4 \leq 3$ $x_2 + 2x_3 + x_4 \leq 2$ $x_1 + x_2 + x_3 + 5x_4 + x_5 + x_6 \leq 5$ $x_4 + x_6 \leq 1$ $x_4 + x_5 \leq 1$

em que

$x_{ik}$  é a variável binária associada à unidade de manejo  $i$  no período  $k$ ;

$k$  é número de períodos de colheita do horizonte de planejamento;

$n_i$  é a quantidade de unidades colheita pertencentes ao conjunto;

$\text{adj}_i$  é o conjunto de índices correspondentes para o conjunto de unidades de colheita adjacentes  $i$ ; e

$\{i = 1, 2, \dots, N\} \{k = 1, 2, \dots, H\}$ .

Gomide et al. (2010) e Augustynczyk (2014) resolveram o modelo tipo I do planejamento florestal com algoritmo genético, adicionando as restrições de adjacência entre talhões de tipo MRU e MRA. Os autores verificaram que a utilização MRU gerou uma menor quantidade de restrições, sendo esse resultado também verificado por Nascimento (2014). O uso dessa restrição entre unidades de manejo, deixou algumas dessas ociosas no final do planejamento. Além disso, ocorreu maior dispersão entre as áreas a serem colhidas, resultando no aumento dos gastos com construção de estradas ao longo do horizonte de planejamento. A aplicação da MRU é recomendada nos blocos de colheita. Esses blocos podem ser formados agrupando os talhões de forma aleatória, ou utilizando as metodologias *Thiessen* ou *Block Building*, por exemplo (MURRAY; WEINTRAUB; 2002).

A inclusão da restrição MRA gera menor impacto no valor da função objetivo, em relação aos resultados gerados pela abordagem MRU (GOMIDE et al., 2010; AUGUSTYNCZYK, 2014). Este tipo de restrição permite a formação de blocos de colheita, de maneira a diminuir a dispersão das unidades de colheita e, portanto, o custo com o deslocamento da frente de

colheita, manutenção de estradas e transporte. Segundo Augustynczik (2014), o aumento na restrição de área limite é acompanhado em acréscimo no número de blocos possíveis de colheita. No entanto, a MRA tem uma formulação mais complexa, pois é necessário a determinação de todos os blocos possíveis inferiores a área limite. Assim, este tipo de abordagem exige o uso de algoritmo mais elaborados para sua formulação (AUGUSTYNCZIK, 2014).

Binoti (2010) resolveu o modelo I da regulação florestal utilizando o algoritmo genético, tendo inserido nesse modelo diferentes estratégias socioambientais, além da restrição de adjacência do tipo MRU. O autor verificou que independente da estratégia considerada, o valor presente líquido global era menor em comparação aos resultados gerados pelo método clássico de regulação florestal. Os melhores resultados econômicos e socioambientais, foram obtidos com a minimização do índice de área de colheita (IAC). O IAC é utilizado para avaliar os resultados das restrições de adjacência (BASKENT; JORDAN, 1995). Esse índice é obtido pela média ponderada do inverso da menor distância ao quadrado entre as unidades cortadas no mesmo período  $k$ , pelas áreas ao quadrado das unidades de manejo que sofreram intervenção. Assim quando menor o IAC melhor ambientalmente será o plano de manejo (BINOTI, 2010). Essa abordagem permitiu reduzir o número de restrições. Na equação 22 é apresentada a formulação do IAC utilizada no trabalho como função objetivo:

$$IAC = \frac{\sum_{k=0}^{H-1} \sum_{i=1}^m A_i^2 \left(\frac{1}{d_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^m A_i} \quad (\text{eq. 22})$$

em que

$IAC$  = índice de cobertura sem florestal;

$A_i$  = área da unidade de manejo  $i$  com intervenção, em hectares; e

$d_i$  = distância até a unidade de manejo mais próxima com intervenção, em quilômetros.

Nascimento (2014) avaliou os algoritmos enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO), PSO com intensificação de busca em vizinhança e Busca Tabu, aplicados ao modelo I de planejamento florestal, incluindo restrições do tipo MRU e MRA. Nesse trabalho foram avaliadas diferentes configurações para os algoritmos. O algoritmo Busca Tabu apresentou melhor desempenho dentre as alternativas testadas. No entanto, não foi objetivo do autor avaliar o efeito das restrições espaciais em relação aos resultados obtidos pelo método exato de programação sem a consideração espacial.

Outra abordagem do manejo da paisagem nos modelos de longo prazo, é o estabelecimento de corredores florestais ligados a floresta de produção. Esses corredores têm como objetivo diminuir o efeito de borda nos fragmentos de vegetação nativa, e facilitar o fluxo genético e a conservação de ambientes naturais. A conectividade entre os fragmentos de vegetação nativa adjacentes e a florestas de produção de rápido crescimento, foi incorporada no modelo tipo I do planejamento florestal por Moreira (2008) utilizando uma configuração em grafo. O modelo de programação linear inteira mista (PLIM) proposto tem como objetivo maximizar o lucro (ou produção) considerando as tradicionais restrições financeiras e operacionais e, a conectividade entre as unidades de produção e os fragmentos de vegetação nativa.

O agrupamento dos talhões em blocos de colheita, nos planos de longo prazo, fornece subsídios para a realização dos planos operacionais. Esse tipo de consideração pode reduzir o custo com deslocamento das máquinas, transporte e construção de estradas. Augustynczik (2014) testou diferentes abordagens para a formação dos blocos de colheita, considerando o modelo I da PLIM e o modelo de múltiplos objetivos *Goal Programming*, para o horizonte de planejamento de 16 anos. Os melhores resultados foram encontrados com o modelo de múltiplos objetivos, utilizando como FO maximizar o VPL total da floresta e maximizar as adjacências entre os talhões. O modelo *Goal Programming* foi formulado de maneira a minimizar o desvio para menos no VPL ( $VPL^-$ ) e da soma das unidades adjacentes ( $K^-$ ). A formulação da função objetivo foi:  $Min Z = w_1 K^+ + w_2 VPL^-$ , em que  $w_1$  e  $w_2$  representam os pesos relativos a cada FO, e foram definidos por meio de testes (AUGUSTYNCZI, 2014).

### ***3.7 Regulação florestal envolvendo desbaste e multiprodutos***

Os modelos de regulação que envolvem operações de desbaste tendem a ser mais complexos, pois o número de prescrições aumenta progressivamente quando se aumenta a intensidade e pesos de desbaste. Uma solução (SANTOS, 2008), é reduzir as alternativas de manejo, de forma a selecionar as melhores prescrições de desbaste para cada estrato. Isso pode ser feito selecionando os maiores valores de um determinado fator de produção  $c$  por unidade de área do estrato  $i$  sobre o efeito dessa  $j$  prescrição (período e intensidade de desbaste). Esse refinamento do espaço solução pode ser feito com técnicas de otimização, como por exemplo a programação dinâmica (SANTOS, 2008). As alternativas selecionadas para cada estrato  $i$  são utilizadas nos modelos regulação da produção. O período e intensidade de desbaste em cada estrato são então selecionados de forma que no conjunto de áreas total por período de colheita sejam atendidas às restrições de volume por produto, e com isso obtido um valor máximo global

de *c*. Após o período de transição, a floresta estará regulada de forma garantir um fluxo contínuo de madeira para diferentes produtos.

## 4 PLANEJAMENTO TÁTICO

A maioria das tomadas de decisão deixadas para os planos táticos é de ordem espacial, devido a incapacidade dos modelos estratégicos tradicionais de resolvê-los com eficiência (BASKENT; KELES, 2005). Nessa fase, o objetivo é programar as operações de colheita em áreas específicas e em uma escala de tempo mais refinada (MARTELL et al., 1998). O nível tático, utiliza como restrições as tomadas de decisão dos planos estratégicos e tenta traduzir essas decisões para uma resolução espacial menos agrupada, de maneira a satisfazer restrições mais detalhadas (CHURCH et al., 2000). O horizonte de planejamento deste nível, no Brasil, não ultrapassa uma rotação, variando, na maioria das vezes, entre 3 a 7 anos para plantios de eucalipto (WERNEBURG, 2015).

Os critérios comumente considerados nos planos táticos são: construção de novas estradas e manutenção das existentes, formação de blocos de colheita e redução do tamanho de clareira com restrições de adjacência, dificuldade de colheita e transporte no período seco e chuvoso, infraestrutura de apoio e probabilidade de ocorrência de sinistros (BOYCHUK; MARTELL, 1996; MARTELL et al., 1998; BASKENT; KELES, 2005; WERNEBURG, 2015). Os critérios espaciais podem ser considerados de forma exógenas ou endógenas (integradas) aos modelos de otimização de longo prazo (ÖHMAN, 2002).

O planejamento espacial exógeno não inclui qualquer informação que envolva as relações de distância entre unidades de manejo no processo de otimização global da floresta, mas leva em conta restrições espaciais pré-determinadas (BASKENT; KELES, 2005). Neste caso, os planos de longo prazo fornecem como informações principais, a idade ótima de corte para cada unidade de manejo, e a quantidade de volume disponível para ser cortada anualmente. Essas decisões são repassadas, para os níveis mais baixos do planejamento em um processo de informação do tipo *top-down* (ANDERSSON, 2005; KANGAS et al., 2015). A partir dessas informações, os planos táticos são elaborados de forma a englobar os critérios espaciais acima definidos, e repassam os resultados como metas a serem atingidas para os planos de curto prazo (BEAUDOIN et al., 2008).

No Brasil, os resultados dos planos táticos têm auxiliado na identificação dos pontos críticos, e no refinamento dos modelos estratégicos a partir do replanejamento (Santana, 2015).

Esse refinamento do plano de longo prazo permite aproximar as atividades planejadas das realmente executadas. No entanto, conforme Andersson (2005), o planejamento hierárquico pode induzir a grandes discrepâncias. Isto acontece principalmente se os critérios inseridos nos modelos de longo de prazo resultarem em grande impacto no objetivo final do empreendimento. Um exemplo é a solução global obtida nos planos estratégicos não espacial. A solução global obtida nos planos estratégicos neste tipo de planejamento, pode não ser ideal nos níveis mais baixos, bem como, os planos gerados para cada sub-região, podem não incluir as soluções ótimas do global. O resultado gerado pode não ser ideal nos níveis mais baixos, bem como, os planos gerados para cada sub-região, podem não incluir as soluções ótimas do global. A divisão da região em sub-regiões nos níveis mais baixos do planejamento pode afetar na otimização da solução (WEINTRAUB; CHOLAKY 1991). Dessa mesma maneira, as tomadas de decisão no nível tático dependem das informações relativas à capacidade operacional das atividades nas unidades agregadas (BEAUDOIN et al., 2008).

Para elaboração dos planos táticos, as empresas florestais geralmente utilizam informações do pessoal do campo para auxiliar nas tomadas de decisão, ferramentas de sistema de informações geográfica (SIG) e métodos de simulação e ou otimização nas unidades selecionadas para o corte a médio prazo entre outros (MACHADO; LOPES; 2002; SANTANA, 2015). Um exemplo do uso do SIG para a espacialização da produção por sortimento pode ser encontrado em Sponholz et al. (2013). No trabalho de Zagonel et al. (2008), foi proposto um método para determinar densidade ótima de estradas em relevo plano, considerando como componentes da tomada de decisão os custos de estradas, custo de extração com *Skidder*, e os custos de perda da área produtiva.

Atualmente, o desenvolvimento dos modelos de planejamento, aliado aos avanços da tecnologia da informação, tem possibilitado incluir restrições de adjacências e regras sobre a disposição espacial das unidades de colheita, que até então eram considerados no nível tático, nos modelos de longo prazo. Esses modelos endógenos, consideram as disposições espaciais das atividades de gestão incorporada na estrutura matemática dos modelos estratégicos (BASKENT; KELLES, 2005). Assim é possível gerar planos de longo prazo integrados e eficazes, tanto do ponto de vista econômico, quanto do ponto de vista ambiental (ÖHMAN, 2002; BASKENT; KELLES, 2005). Essas abordagens monolíticas têm sido bastantes discutidas na literatura internacional, com foco principalmente na formação de blocos de colheita e manejo da paisagem (ANDERSSON, 2005; BASKENT; KELLES, 2005).

## 5 PLANEJAMENTO OPERACIONAL

As decisões estratégicas e táticas não conduzem diretamente às atividades reais que estão sendo realizadas. Isso acontece no nível operacional, no qual são determinadas as ações específicas e dimensionamento dos recursos em menor período de tempo e espaço. Os planos operacionais têm por objetivo antecipar todas as atividades associadas diretamente com as operações de colheita (EPSTEIN et al., 2007). No Brasil, o horizonte de planejamento do plano operacional varia entre 12 a 18 meses (WERNEBURG, 2015).

O problema nesta fase, em geral, envolve decidir o sequenciamento do corte nas unidades de colheita (por exemplo: semanal ou mensal), definir quais máquinas devem ser utilizadas em cada área, determinar quais estradas de acesso secundário precisam ser construídas, agendar o transporte, dimensionar mão de obra, e determinar o padrão de corte (KARLSSON et al, 2004; EPSTEIN et al., 2007). Quando as decisões envolvem converter cada árvore de forma a retirar os produtos com maior valor de mercado, é necessário considerar a demanda e os preços específicos por produto, bem como as características da árvore em relação ao comprimento, diâmetro e qualidade do fuste (SOARES et al, 2003). Além disso, nas tomadas de decisão no curto prazo é importante levar em consideração aspectos relacionados com a preservação do solo e a qualidade da água (EPSTEIN et al., 2007).

Os modelos para o planejamento operacional envolvem menos variáveis de decisão, pois da mesma forma que os planos táticos, são desenvolvidos para florestas maduras. O problema de agendamento mensal das unidades de corte, influência nas tomadas de decisão em relação ao plano logístico do maquinário, nas atividades de transporte e no investimento em estradas (AUGUSTYNCZIK, 2014). Os critérios a serem considerados para a formulação dos modelos de curto prazo, depende da maneira de como as informações espaciais e as restrições são detalhadas nos níveis mais alto. Mas, em geral, são levados em conta as metas volumétricas anuais definidas nos planos estratégicos, a distribuição espacial quando definida nos planos táticos, o deslocamento da frente de colheita, a variação das condições da estrada e a impossibilidade de colher algumas áreas durante certo período entre outras (KARLSSON et al., 2004; EPSTEIN et al., 2007; BREDSTRÖM et al., 2010; BANHARA et al., 2010). Nas florestas de rápido crescimento, o crescimento mensal no ano de corte pode ser utilizado para o sequenciamento das unidades de colheita (SANTOS, 2014).

Quando uma atividade prevista nos planos de longo prazo não é implementada no seu tempo estipulado, seja por impedimentos meteorológicos, falta de mão-de-obra, disponibilidade

e manutenção de máquinas, as atividades definidas para os próximos anos são replanejadas, considerando as alterações ocorridas na fase imediata (Figura 1). O plano tático, representa uma série de alterações das atividades operacionais (BEAUDOIN et al., 2008).

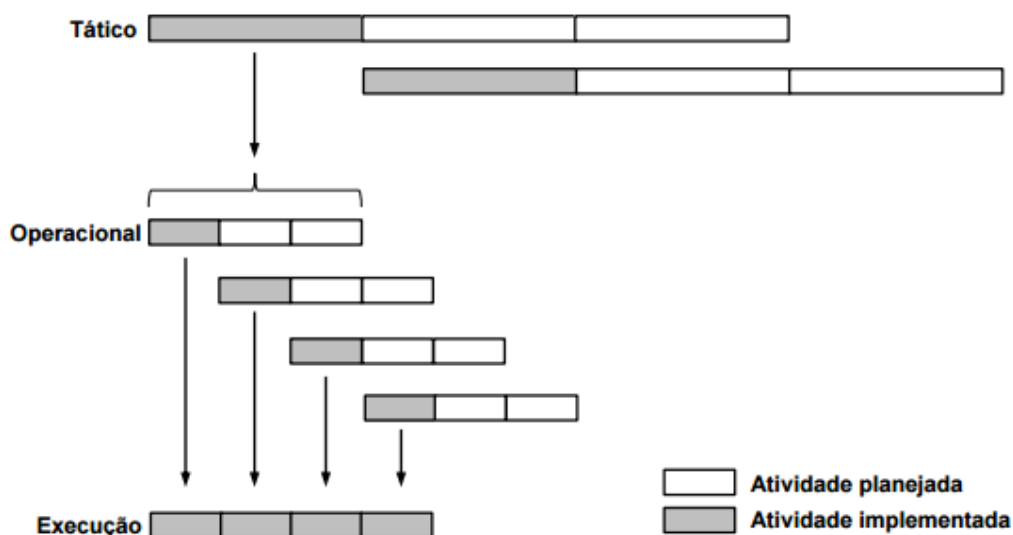


Figura 1 – Planejamento hierárquico – Atividades planejadas e implementadas.  
Fonte: Beaudoin et al. (2008).

Esforços para a modelagem das operações de colheita e transporte principal de maneira integrada têm sido verificadas na literatura considerando o período mensal com horizonte de planejamento de 12 meses (RÖNNQVIST, 2003; BEAUDOIN et al., 2008). No entanto, modelos para o planejamento dessas atividades em conjunto considerando períodos diários e semanais, são ainda incipientes (RÖNNQVIST et al., 2015). Um exemplo deste tipo de abordagem mensal pode ser verificado em Karlsson et al. (2004). Neste trabalho, os autores desenvolveram um modelo de PLIM de múltiplos objetivos, para o planejamento anual das atividades de colheita, incluindo nesse, decisões sobre áreas, alocação simultânea de equipes, transporte principal e planejamento do armazenamento.

#### ***- Modelos matemáticos para a ordenamento da colheita no nível operacional***

As técnicas de programação linear fornecem uma estrutura matemática capaz englobar diferentes critérios operacionais, sociais e ambientais, nos diferentes níveis do planejamento (AUGUSTYNCZIK, 2014). Com dificuldades de resolução diminuindo hierarquicamente dos modelos estratégicos aos operacionais. Nos itens abaixo são apresentados trabalhos publicados

no Brasil para os sequenciamentos das atividades de colheita, utilizando os modelos matemáticos tipo I e II da PL ou PLIM.

### 5.1 Ordenamento da colheita florestal

As restrições operacionais e sociais foram consideradas por Rodriguez e Martini (1989), para o sequenciamento das atividades de colheita e do plantio no curto prazo. O autor utilizou o modelo tipo I do planejamento e resolveu o problema com a programação linear. O objetivo do modelo foi minimizar o período entre o corte e a reforma da área, utilizando a seguinte formulação  $Min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^H \sum_{k=1}^H P_{ijk} x_{ijk}$ . A tomada de decisão foi sobre a área, em ha, de uma unidade de trabalho  $i$ , explorada no mês  $j$ , com a próxima intervenção prevista para o mês  $k$ . Essa área  $i$  é associada a perda mensal de volume, ou receita, devido a espera entre o corte e a reforma, por ha, explorada no mês  $j$  e reformada no mês  $k$ . As restrições operacionais foram: nível constante de produção mensal, concentração das atividades de plantio nos meses chuvosos, demanda mensal de mão-obra variável dentro de determinados limites, e a não utilização de horas máquinas acima da disponibilidade mensal média.

O modelo tipo II de programação linear inteira mista (PLIM) foi utilizado por Banhara et al. (2010) para o sequenciamento das atividades de colheita e baldeio. O autor incorporou aspectos operacionais e considerou o risco climático na formulação do problema. A tomada de decisão foi sobre a área da unidade de manejo  $i$  com atividades de colheita e baldeio a serem programadas no período  $k$  e  $j'$  respectivamente considerando o horizonte de planejamento de 18 meses. A função objetivo teve como componentes os seguintes critérios econômicos: valor presente líquido obtido com a atividade de extração da unidade  $i$  no período  $k$  e o custo de colheita da unidade  $i$  no período  $j$ . Foram incluídos o custo de não baldear a área  $i$  no período  $k$  cortadas no período  $j$ , e o custo da área não selecionada para o corte no período  $j$  pela equipe  $mo$ . O autor ainda acrescentou penalidades por unidade sub e superestimada em relação a demanda. As restrições consideradas foram: a singularidade da prescrição para determinada unidade manejo, a integridade da área a ser cortada, o atendimento da demanda mensal por volume, a possibilidade da expansão da capacidade operacional, a variação mínima e máxima da densidade média ponderada pelo volume colhido, e a impossibilidade de colheita de alguns talhões em época de excedente hídrico.

A formação de blocos no ano da colheita foi considerada no trabalho de Augustynczyk (2014). O autor formulou o problema utilizando o modelo tipo I da programação linear inteira mista. A área mínima de colheita foi determinada considerando duas abordagens. Na primeira,

o modelo de PLIM, foi tratado como um problema de grafos para determinar a conectividade das unidades adjacentes formulado por Carvajal et al. (2013). Na segunda abordagem, a formação de blocos foi determinada inserindo a restrição de adjacência do tipo MRA formulada por McDill e Rebain (2003). O objetivo dos dois modelos foi definir o tamanho dos blocos que gerasse o maior valor presente líquido da floresta programada para a colheita em determinado ano. Além das restrições de área mínima de colheita, foram incluídas as restrições para o fluxo constante de volume e integridade das unidades de manejo. Os resultados mais satisfatórios encontrados por Augustynczik (2014), foram obtidos com o modelo com estrutura em rede formulado por Carvajal et al. (2013), considerando uma área mínima de colheita de 10 hectares.

O crescimento mensal na idade de rotação foi utilizado para o ordenamento da colheita no ano de corte por Santos (2014). O modelo I da programação linear (PL) foi utilizando considerando três abordagens para a função objetivo: maximizar a produção, maximizar valor presente líquido ou minimizar o custo de colheita e transporte. As restrições consideradas foram: demanda mensal e restrições operacionais, como a impossibilidade de colher alguns talhões nos meses chuvosos, além do rendimento das máquinas na inclinação dos terrenos. Os resultados demonstram que o estoque total de colheita no ano de corte é influenciado pelo crescimento mensal, e pelo ordenamento da colheita ao final do horizonte de planejamento. A otimização postergou o corte dos talhões mais produtivos para o final horizonte de planejamento.

## 6 SÍNTESE

Os modelos (*I*, *II* e *III*) do planejamento estratégico florestal, são robustos em suas formulações, e permitem incorporar diferentes níveis informações na construção dos objetivos ou nas restrições, dependendo da necessidade e preferências do gestor. Nos critérios a serem incluídos nos modelos tradicionais de longo prazo, devem ser consideradas as tomadas de decisão de alto impacto no objetivo maior do empreendimento, como por exemplo, o planejamento espacial e o manejo da paisagem. Quando esses aspectos são considerados nos planos de médio e curto prazo, as tomadas de decisão podem ser muito discrepantes em relação as soluções geradas pelos planos estratégicos. Modificações simples nas funções objetivos e restrições dos modelos estratégicos permitem regular a floresta por estrato, de maneira a garantir que ocorram atividades operacionais anuais nos diferentes locais e tipos de plantios. Estas abordagens integradas resultam em planos de longo prazo mais detalhados, com

organização espacial e regulação da produção por estrato, tornando as operações planejadas para determinado ano mais realísticas. Os modelos estratégicos integrados a informações de médio e curto prazo permitem alterar os parâmetros e simular diferentes cenários de risco.

Da mesma forma que nos planos estratégicos, os modelos *I*, *II* e *III* podem ser utilizados para o sequenciamento mensal das atividades de colheita no ano. A estrutura desses modelos, permite considerar diferentes restrições operacionais em função das necessidades da empresa, e integrar restrições dos níveis táticos e estratégicos aos modelos operacionais. Além disso, dependendo do modelo utilizado, podem ser programadas diferentes atividades no ano de planejamento, como por exemplo, as atividades de colheita e transporte (principal e secundário) considerando o tempo de secagem da madeira ou outras variantes dessas atividades no tempo. No Brasil, a variação de crescimento mensal dos plantios florestais no ano de rotação técnica, apesar de ser baixa, permite sequenciar as atividades programadas para o curto prazo.

## CAPÍTULO 2

# MODELAGEM MATEMÁTICA DO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DAS ATIVIDADES DE COLHEITA, BALDEIO E TRANSPORTE FLORESTAL

## 1 INTRODUÇÃO

O planejamento hierárquico visa simplificar problemas complexos, particionando o processo de tomada de decisão em subproblemas cobrindo diferentes horizontes no tempo. A informação é agregada e desagregada através dos vários níveis de detalhamento exigidos em cada fase do planejamento (BASSET et al., 1996). Os subproblemas podem ser diferenciados temporal ou espacialmente de forma que um nível superior englobe as alternativas de decisão dos níveis inferiores.

No fluxo de informação hierárquica, os resultados dos planos estratégicos são utilizados para nortear os planos táticos e esses por sua vez são utilizados para orientar os planos operacionais (BETTINGER et al., 2004). Em um fluxo contrário, quando as decisões nos níveis mais baixos são conhecidas, essas informações podem ser repassadas para os níveis mais altos do planejamento (KANGAS et al., 2014). Os resultados ótimos de um nível podem ser impraticáveis noutros níveis se, na resolução de cada subproblema, o fluxo de informação não for repassado para os estágios seguintes (ANDERSSON, 2005).

Em um contexto de aquisição de madeira, no planejamento operacional são definidas, de forma sequenciada, as decisões referentes as atividades de colheita, baldeio, transporte e estoque de madeira (em pé, na beira da estrada e nos pátios) para o próximo ano. No processo de elaboração deste tipo de plano, as informações são desagregadas em alternativas mais detalhadas, em relação ao deslocamento de máquinas e equipes entre as áreas (BANHARA et al., 2010; BREDSTRÖM et al., 2010; ZAGONEL et al., 2008); capacidade das atividades (LIMA, 2009; AUGUSTYNCZIK, 2014); dimensionamento da mão de obra; e sortimento a ser retirado em cada área (VANZETTI et al., 2019). Em planos de curto prazo é importante considerar aspectos relacionados com a conservação do solo e água (EPSTEIN et al., 2007); manutenção das estradas e impedimentos das atividades ocorrerem em determinados períodos (DEMS et al., 2017).

A maioria dos modelos matemáticos para o planejamento operacional foi desenvolvido para otimizar as atividades florestais separando e resolvendo subproblemas. Pouca ênfase é

dada a formulações que integrem as tomadas de decisão nesta fase do planejamento (DEMS et al., 2017). Um modelo matemático pode conter tantos detalhes sobre o(s) processo(s) conforme necessário, permitindo integrar diferentes subproblemas. No entanto, quanto mais detalhada é a descrição do processo e, ou, quanto mais longo for a duração do horizonte de planejamento, maior será a formulação gerada. Isso pode levar a problemas intratáveis, dados os recursos computacionais disponíveis (BASSET et al., 1996). Por outro lado, segundo Basset (1996), esse tipo de formulação permite a decomposição do horizonte de planejamento em diferentes períodos; e a solução do problema particionado com métodos de programação inteira mista.

Os objetivos deste estudo foram:

- i) Desenvolver um modelo matemático de otimização para o planejamento operacional integrando as atividades de colheita, baldeio e transporte e o detalhamento temporal e espacial das informações utilizada no processo de geração das alternativas.
- ii) Demonstrar a aplicação do modelo em um caso de uso.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### ***2.1 Fazenda-modelo: descrição e modelo conceitual***

No presente trabalho foi gerada uma fazenda-modelo contendo 88 talhões (unidade de manejo definidas para o corte) distribuídos em um raio de até 100 km da fábrica. A malha de estradas foi retirada da uma base de dados de uma empresa florestal do setor de celulose. Na Figura 1 é ilustrado a fazenda-modelo, a distribuição dos talhões na fazenda, malha das estradas e o destino da madeira.

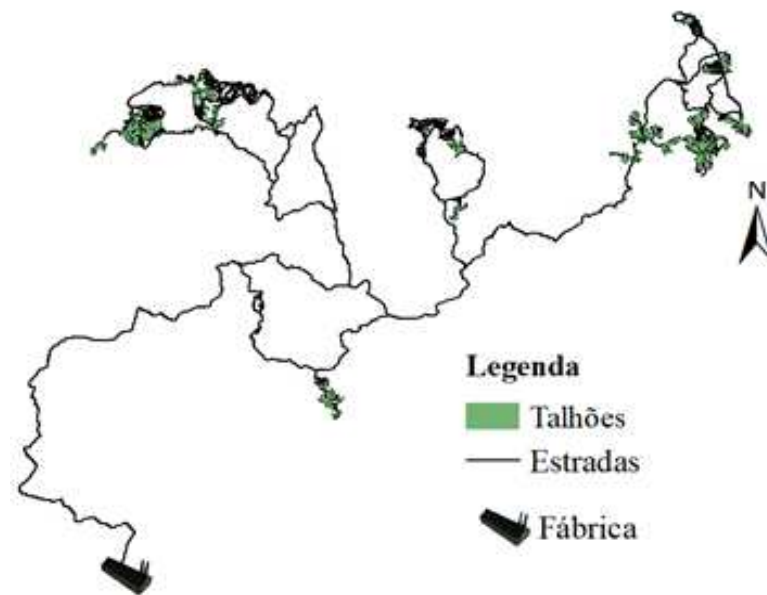


Figura 1 – Mapa da fazenda-modelo: distribuição dos talhões, estradas e a fábrica de destino.

As unidades de manejo foram estratificadas em função das características do terreno que mais afetam a execução das operações e colheita e transporte. A partir das curvas de nível foi gerado um modelo digital de elevação do terreno com o algoritmo *Triangular Irregular Network* (ERSI, 2014) das áreas talhonadas. As inclinações resultantes foram agrupadas em três classes de atuação das máquinas florestais: áreas planas ( $<27^\circ$ ), áreas moderadamente inclinadas (entre  $27^\circ$  e  $35^\circ$ ) e áreas com inclinação acentuada ( $>35^\circ$ ) (Figura 2). As áreas estratificadas em classes com a mesma atuação de máquinas foram denominadas de unidades operacionais. A estratificação dos talhões resultou em 382 unidades operacionais.

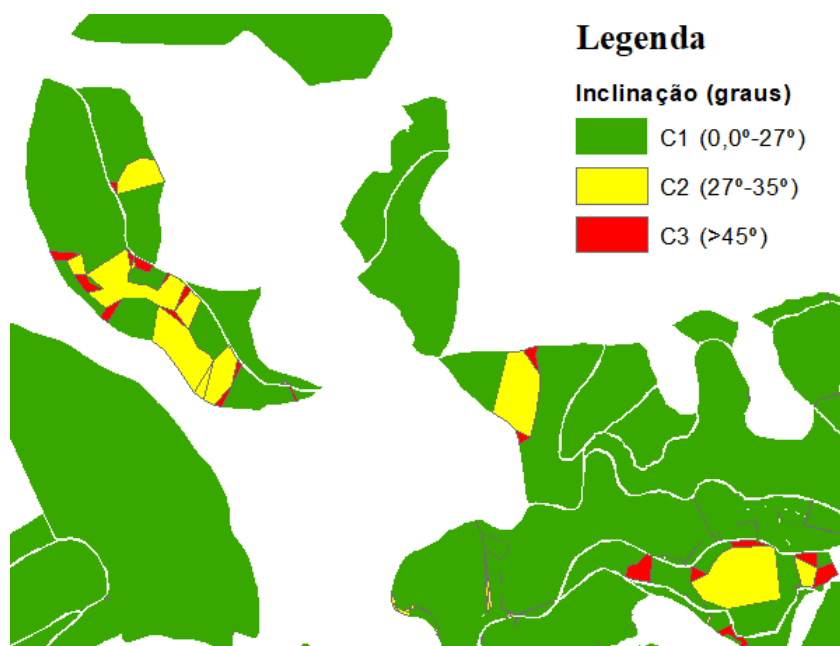


Figura 2 – Exemplo de formação das unidades operacionais com três classes de declividades.

## 2.2 Projeção do crescimento semanal

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de parcelas permanentes de eucaliptos mensuradas entre os anos de 2006 e 2013, distribuídas em 16 projetos. Esses dados foram cedidos por uma empresa florestal situada no estado de Minas Gerais. As variáveis obtidas pelo inventário florestal contínuo em cada ano e parcela foram: os diâmetros a 1,3 m de altura ( $dap$ ), em centímetros, a altura total ( $Ht$ ) e altura dominante ( $Hdom$ ), em metros, e o volume, em  $m^3ha^{-1}$ , com idades variando entre 30 e 117 meses. Os dados destas parcelas foram georreferenciados com os talhões da fazenda-modelo.

A capacidade produtiva de cada talhão foi determinada pelo método da curva-guia, empregando o modelo  $LnHd = b_0 + b_1/Idade + e$ , para uma idade-índice de 72 meses. Para estimar a produção volumétrica mensal foi ajustado o modelo Gompertz. Esse modelo foi ajustado pelo método de predição de parâmetros (SANTOS et al., 2017). Para isto, o modelo Gompertz foi inicialmente ajustado para diferentes classes de sítio. Com base em uma matriz de correlação linear entre as estimativas dos três parâmetros e os índices de sítio, foi definida a equação a ser empregada para projetar o volume ( $m^3mês^{-1}$ ) para todos os talhões.

A partir das correlações lineares mencionadas foi verificado que somente os coeficientes assintóticos das equações (a) explicaram o efeito do índice de sítio (S), com  $r_{v\hat{v}}=0,735$ . Assim as seguintes modificações para o parâmetro assintótico ( $\beta_0$ ) do modelo de Gompertz foram

testadas, conforme sugerido por Campos e Leite (2013):  $\beta_0 = \alpha_0 + \alpha_1 S$ ,  $\beta_0 = \alpha_0 + \alpha_1 S + \alpha_2 S^2$ ,  $\beta_0 = \alpha_1 S$ .

As melhores estimativas volumétricas foram obtidas incluindo a modificação  $\beta_0 = \alpha_1 S$  no modelo de Gompertz. A equação ajustada e utilizada para estimar o volume para cada prescrição do modelo de otimização (eq.1), foi:

$$\hat{V} = 9,8577 * S \exp(-\exp(-0,6164 - 0,05780 * Idade)); \bar{R}^2 = 0,95 \quad (\text{eq. 1})$$

em que  $\hat{V}$  é o volume estimado e  $I$  é a idade em meses.

Com a equação eq. 1, as projeções volumétricas foram feitas da seguinte forma: os talhões com idade menor que 60 meses tiveram os volumes projetados para 84 meses. Com todos os volumes para idades maiores que 5 anos, a equação foi aplicada para projetar o volume semanalmente em cada mês possível de ocorrer a colheita a partir da idade de rotação (em meses). Os meses considerados para a colheita foram o mês 1(janeiro), 2 (fevereiro), ...,  $H$ , em que  $H$  é o horizonte de planejamento. Já as semanas foram obtidas pela divisão do mês em quatro partes: 0,24 (semana 1); 0,49 (semana 2); 0,74 (semana 3); 0,99 (semana 4). Assim, por exemplo, para um talhão com 84 meses no ano de corte as seguintes possibilidades de projeções semanais do volume colhido seriam consideradas para os meses de janeiro (mês de corte 1) e julho (mês de corte 7):

Mês de janeiro:  $V_{1,1} = f(S, I = 84+1+0,24)$ ,  $V_{1,2} = f(S, I = 84+1+0,49)$ ; ... ;  $V_{1,4} = f(S, I=84+1+0,99)$ ;

Mês de setembro:  $V_{7,1} = f(S, I = 84+7+0,24)$ ,  $V_{7,2} = f(S, I = 84+7+0,49)$ , ... ;  $V_{7,4} = f(S, I = 84+7+0,99)$ , em  $V_{hk}$  é o volume projetado para o mês  $h$  ( $h=1, \dots, H+1$ ) e a semana  $k$  ( $k=1,2,3,4$ ).

Os volumes foram projetados para gerar as alternativas de corte semanais para cada unidade operacional. Como as projeções volumétricas foram feitas para o talhão, a porcentagem que cada subárea correspondia foi utilizada para os cálculos dos volumes correspondentes a unidade operacional.

### 2.3 Custo da colheita e baldeio da madeira

As limitações de cada máquina de colheita e baldeio em relação a topografia do terreno foram consideradas ao associá-las a cada classe de inclinação dentro do talhão, durante o horizonte de planejamento. Por exemplo, quando a *harvester* é programada como alternativa de colheita para um determinado talhão, as atividades dentro do mesmo só ocorrerão onde as inclinações do terreno não excederem a 27°. Se existirem áreas com inclinações que afetam ou impedem as operações da *harvester*, máquinas e equipamentos adequados, como por exemplo guinchos acoplados as colheitadeiras, são programados para a colheita dessas áreas. A associação das máquinas de baldeio nas áreas do talhão foram feitas considerando, além da inclinação do terreno o tipo de colheitadeira utilizada. Na Figura 3 foi feita a associação das alternativas para as atividades de colheita e baldeio nas unidades operacionais.

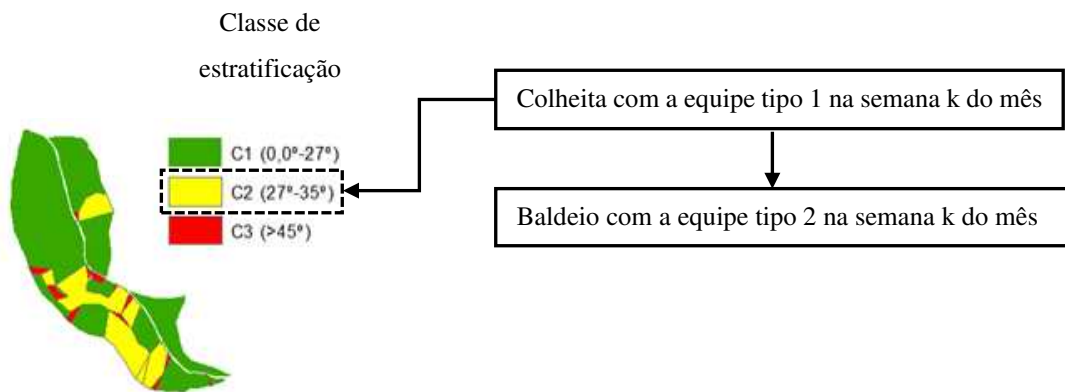


Figura 3 – Associação das alternativas de colheita e baldeio nas unidades operacionais na classe 2 de inclinação.

A distância de baldeio é um dos fatores que mais afetam o custo desta atividade (LEITE, et al., 2014; SCHETTINO et al., 2015). Assim para calcular o coeficiente de custo da atividade de baldeio foi necessário determinar a distância e direção ótima de extração da madeira até a estrada mais próxima. Para a simplificação do estudo de caso, foi considerado que as estradas selecionadas para a extração da madeira no presente trabalho não apresentavam nenhum empecilho como por exemplo reserva legal, rios, propriedade privadas, entre outros. A distância entre essas estradas e o arraste da madeira foram calculadas para cada unidade operacional, considerando a área projetada, ou seja, a área real com o efeito da inclinação. Com essa nova quantidade de área real de cada unidade operacional foram definidos os novos centroides,

referentes a cada inclinação apresentada pelo terreno. A estrada que resultou no menor deslocamento de extração, ou seja, a estrada mais próxima do centroide, foi determinada com algoritmo da ferramenta *near* presente no *ArcMap* (ESRI, 2014), o qual calcula a distância euclidiana entre os pontos. Nesse ponto foi definida a localização (x,y) da pilha de madeira na beira da estrada.

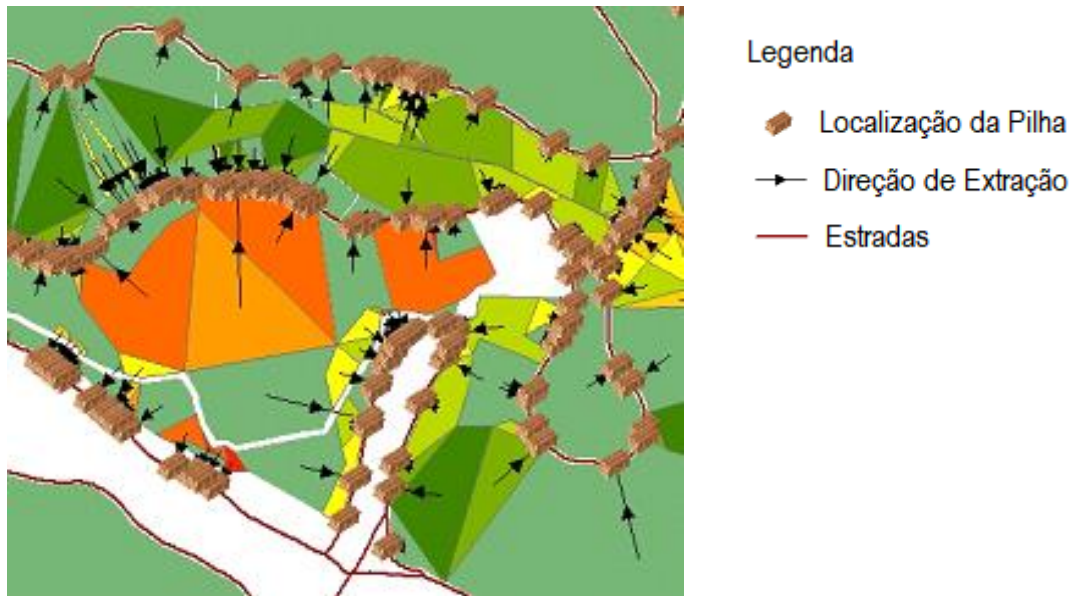


Figura 4 – Distância de baldeio e direção da extração e localização das pilhas na beirada da estrada para cada unidade operacional.

Após a identificação das alternativas de colheita e baldeio apropriadas para cada unidade operacional, foram calculados os coeficientes técnicos dos custos resultantes dessas atividades e o rendimento do ciclo operacional para cada alternativa. As máquinas consideradas para a colheita foram: *Feller-Buncher* e *Harvester*. No caso da *Feller-Buncher* foram inseridos custos do processamento da madeira no campo. Para as atividades de baldeio, as máquinas utilizadas foram: *Skidder* e *Forwader*. As equações para estimar o rendimento e o custo das atividades foram selecionadas na literatura nos trabalhos de LEITE et al. (2014) e SCHETTINO et al. (2015).

Devido à escassez de informações sobre os custos das atividades com guinchos acoplados, foram ajustadas equações de custo em função do rendimento com os valores estimados pelas equações encontradas na literatura. A partir dessas novas equações foi simulada uma perda de rendimento de 10% nas atividades em inclinações acentuadas ( $>45^\circ$ ) em relação

as áreas planas. Essa perda de rendimento teve como objetivo simular o acoplamento dos guinchos nas colheitadeiras e máquinas de extração.

As equações de custo em função do rendimento operacional das máquinas foram utilizadas para simular as perdas de produtividade dos operadores menos experientes em relação aos operadores mais experientes (Equipe 1), da seguinte forma: operadores com experiência intermediária (Equipe 2) tiveram rendimento 21% menor; os operadores com pouca experiência (Equipe 3) tiveram um rendimento menor 36%. Essas perdas foram adaptadas do trabalho de Leonello et al (2012).

## 2.4 Transporte da madeira

A distância de transporte foi determinada pela rota ótima entre as pilhas dispostas na beirada da estrada e a fábrica, utilizando o algoritmo de Dijkstra presente na ferramenta *Closest Facilit* do *Network Analyst* do ArcMap (ESRI, 2014).

Após otimizar e definir as rotas por onde o transporte será realizado, foi calculado o volume real que seria transportado considerando o tempo de secagem da madeira no campo. Para isso foram utilizadas equações que relacionavam o teor de umidade (%) da madeira em função dos meses de colheita (janeiro a dezembro) fornecidas por uma empresa produtora biomassa florestal para energia. As equações foram aplicadas da seguinte forma: se a madeira fosse baldeada para a beirada da estrada na semana  $k$  do mês  $h$ , o transporte poderia ocorrer na mesma semana ou nas semanas subsequentes até completar o tempo máximo de 4 meses que a madeira poderia permanecer no campo. Assim o volume úmido das unidades operacionais obtido com o corte na semana  $k$  seria reduzido semanalmente até completar o tempo máximo (4 meses). As alternativas de secagem semanal da pilha foram calculadas a partir da seguinte relação:

$$V_{sh(k+1)} = V_{shk} - \left( TU\% * \frac{V_{shk}}{100} \right) \quad (\text{eq. 2})$$

em que  $V_{shk}$  é o volume no processo de secagem ( $s$ ) no mês  $h$  na semana  $k$ ,  $V_{sh(k+1)}$  é o volume no processo secagem de madeira colhida no mês  $h$  na semana  $k+1$ ,  $TU$  é o teor de umidade no mês  $h$ . Na Figura 5 são apresentadas, como exemplo, as curvas de custo da unidade operacional 1, resultante do volume obtido com cinco meses de secagem no campo.

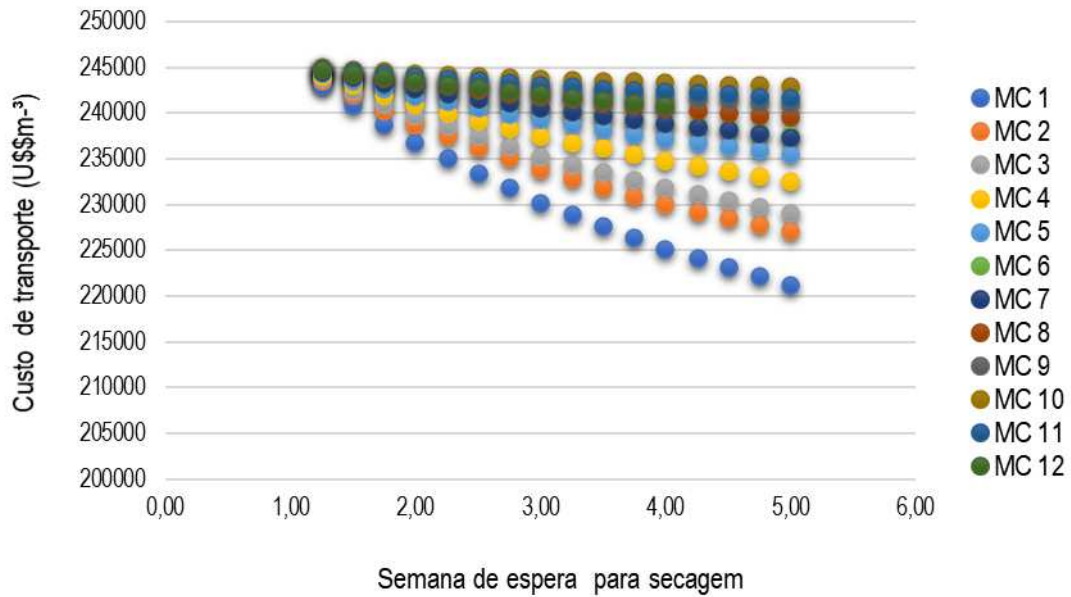


Figura 5 – Variação semanal do custo de transporte (U\$\$m<sup>-3</sup>) da unidade operacional 1, no talhão 441 (Projeto 609), em função da curva de secagem mensal, em que MC é o mês que ocorreu a colheita.

Com os volumes das pilhas com alternativas de secagem semanal, foram calculados os custos de transporte para cada unidade operacional colhida, levando em consideração um tipo de composição veicular, o Bitrem, com o valor de frete de 1,1287(U\$\$m<sup>-3</sup>km<sup>-1</sup>). Para o transporte da madeira foi considerada somente a alternativa de transporte rodoviário, sem pátios intermediários e com uma composição, o que não impede que o modelo possa incluir mais alternativas transporte conforme cada situação encontrada.

## 2.5 Modelagem matemática

### 2.5.1 Função objetivo

O desmembramento das áreas faz com que a variável de decisão do modelo matemático seja referente a área  $x$  da  $i'$ -ésima classe de estratificação do  $i$ -ésimo talhão. A representação matemática das unidades operacionais (variável de decisão) é apresentada abaixo:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n A_{i'i} \quad (\text{eq. 3})$$

em que:

$A_{i'i}$  é a unidade operacional  $i'$  do talhão  $i$ ;

$\forall_{i'} = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  é  $m$ -énésima classe de estratificação do talhão;

$\forall_i = 1, \dots, n$ ,  $n$ -ésima unidade de manejo selecionada para a colheita.

Após definir a variável de decisão, a próxima etapa do processo de modelagem matemática consistiu em gerar as alternativas de máquinas e equipes disponíveis para realizarem as atividades de colheita ( $c_i$ ) e baldeio ( $b_i$ ), em cada unidade operacional. Para cada prescrição de colheita e baldeio, correspondente ao tipo de equipe e período em que essas atividades iriam ocorrer em cada unidade operacional  $i'$ , o modelo associou todas as  $s$  alternativas de espera de secagem da pilha de madeira, para que o transporte ocorresse com o menor custo possível com o atendimento das restrições impostas. A quantidade de alternativas de transporte variou desde o  $k'$  período, em que o baldeio aconteceu, até o último período  $s$  em que a madeira poderia ficar em campo ( $S_{max}$ ). Ao considerar que  $H$  expressa o último período do plano de corte, o horizonte do plano de transporte será igual  $H + S_{max}$ . Isto pressupondo que o intervalo de tempo das alternativas de colheita e secagem da madeira sejam os mesmos (por exemplo: semanal). Caso contrário, os intervalos dos períodos devem ser compatibilizados para a determinação do tamanho do horizonte para cada atividade.

No caso de limitações operacionais, como por exemplo, impedimento das atividades de colheita e ou baldeio em determinada época do ano, devido à chuva, ou do transporte devido às condições das estradas; as prescrições que correspondem as essas situações não são geradas para as unidades operacionais.

O processo de geração das alternativas é exemplificado na Tabela 1, com o exemplo de modelagem das atividades para a unidade operacional 1, considerando o horizonte de planejamento da colheita de 12 meses, com a espera máxima da pilha de madeira no campo programada para no máximo quatro meses. Neste exemplo, se as atividades de colheita e baldeio na unidade operacional 1, para a alternativa de equipe de colheita 1 e equipe de baldeio 2, forem agendadas para ocorrerem em alguma semana do mês 3, o transporte da pilha de madeira poderá ocorrer em alguma semana dos meses 3, 4, 5 ou 6. As atividades de corte e extração na unidade operacional 1 foram associadas a todos os  $h$  meses do plano corte em que não ocorre nenhum impedimento para a execução destas. De forma similar, para cada  $h$  mês de possibilidade de colheita e baldeio, foram associadas as  $k''$  alternativas de período em que o transporte poderá ocorrer.

Tabela 1 – Esquema para geração de prescrição do modelo proposto, com intervalo semanal, considerando o horizonte de planejamento 12 meses para a colheita, baldeio e 4 meses para o transporte

Classe de inclinação (i')	Talhão i (ha)	Colheita		Baldeio		Mês			Semana			Horizonte de Planejamento (H)														
		Máquina	Equipe	Máquina	Equipe	Colheita (h)	Baldeio (h')	Transporte (t)	Colheita (k)	Baldeio (k')	Transporte (k'')	0	1	2	3	4	5	6	...	10	11	12	...	14		
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	1	1	1	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	2	2	1	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	3	3	1	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	4	4	1	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	1	1	2	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	2	2	2	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	3	3	2	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	4	4	2	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	1	1	3	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	5	4	4	4	0	1	2	$X_{cb}$	1	$X_t$									
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	6	1	1	1	0	1	2	$X_{cb}$	1	2	$X_t$								
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	6	2	2	1	0	1	2	$X_{cb}$	1	2	$X_t$								
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	6	3	3	1	0	1	2	$X_{cb}$	1	2	$X_t$								
1	U1	HV	E1	FW	E1	3	3	6	4	4	1	0	1	2	$X_{cb}$	1	2	$X_t$								

em que HV é a colheitadeira *Harvester*; FW é a máquina *Forwarder*; E1 é a curva de rendimento da equipe tipo 1;  $X_{cb}$  é a prescrição de colheita e o baldeio associada ao período  $h$ ; e  $X_t$  é a prescrição de transporte associado ao período  $t$ .

Conforme a Tabela 1, o horizonte de planejamento do transporte é dependente do horizonte de planejamento da colheita e extração. Neste, as atividades são integradas no tempo através da curva de secagem. Para as alternativas de colheita e extração no último período do horizonte de planejamento ( $H - 1 =$  mês 11), a atividade de transporte terá as possibilidades de ocorrência nos meses 11,12,13 ou 14 ( $H + S_{max} - 2 = 12+4-2 = 14$ ), considerando que as atividades iniciam no período zero do horizonte de planejamento.

Com as prescrições de colheita, baldeio e transporte definidas, foram calculados os valores monetários que compõem os coeficientes técnicos do modelo. Para cada alternativa de corte foi gerada uma receita bruta ( $R_k$ ) utilizando uma curva de crescimento periódico semanal (ou mensal), por exemplo; e o preço da madeira. Da mesma forma, os custos referentes as atividades de colheita ( $C_{Ck}$ ), baldeio ( $C_{Bk}$ ) e transporte ( $C_{Vs}$ ) foram calculados para todas as possíveis combinações geradas para cada unidade operacional, considerando as equações específicas de rendimento das máquinas e operadores em cada área e, no caso do transporte, o custo em função do volume em diferentes tempos de secagem. Na Figura 7 é esquematizado o fluxo de caixa considerando o intervalo de tempo mensal, para o agendamento da atividade de transporte ( $C_{Vs}$ ), com programação para o final do mês 7 e semanal, para as atividades de colheita e baldeio, com programação para o início da quarta semana do mês 4.

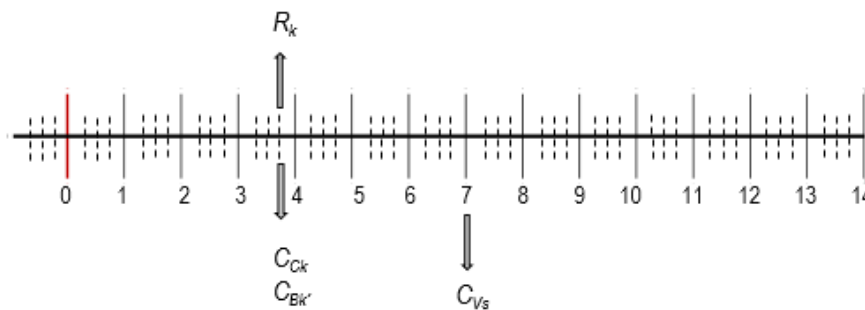


Figura 6 – Fluxo de caixa, exemplificando a modelagem de uma alternativa para as atividades para a unidade operacional 1, com colheita e baldeio programados para a terceira semana do mês 4 e transporte programado para o mês 7. A receita e os custos foram compatibilizados para ocorrerem o final do mês zero.

Tanto a receita, quanto os custos de todas as atividades envolvidas são descapitalizados utilizando uma taxa de desconto fixa para o período zero do horizonte de planejamento. Os custos antes deste período zero foram capitalizados. No exemplo da Figura 7 o período zero ocorre na última semana do primeiro mês (quarta semana do horizonte de planejamento). Para a avaliação das alternativas operacionais pode ser utilizado qualquer critério econômico que compare projetos com diferentes durações e que considere a variação do capital no tempo, como

por exemplo o valor anual equivalente (VAE). A fórmula considerando o VAE como critério, com a primeira parcela ocorrendo no final de cada período, é:

$$VAE = \frac{VPL[(1+i)^t-1](1+i)^{nt}}{(1+i)^{nt}-1} \quad (\text{eq. 4})$$

em que  $n$  é duração do projeto (anos para os planos estratégicos);  $t$  é o período de capitalização; e  $i$  é a taxa de desconto.

A formulação matemática da receita bruta  $R_{f'e'sh}$  obtida com a colheita da área A da unidade operacional  $i'$  no talhão  $i$  com a máquina de colheita  $f'$  e operada pelo operador com experiência tipo  $e'$  na semana  $k$  do mês  $h$ , é:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{k=1}^4 \sum_{h=0}^{H+1} R_{f'e'kh} A_{i'i} \quad (\text{eq. 5})$$

$\forall_{f'} = 1, \dots, f$ ,  $f$ -ésima máquina disponível para a colheita na classe de inclinação  $i'$ ;

$\forall_{e'} = 1, \dots, e$ ,  $e$ -ésima tipo de equipe (ou operador) de colheita;

$\forall_{k} = 1, \dots, 4$ , semana em que ocorre a atividade de colheita;

$\forall_{h} = 1, \dots, H + 1$ ,  $H$ -ésimo mês do horizonte de planejamento.

As demais variáveis já foram definidas.

O custo de colheita  $c_{f'e'sh}$  da área A da unidade operacional  $i'$  no talhão  $i$  com a máquina de colheita  $f'$  e operada pela equipe  $e'$  na semana  $k$  do mês  $h$  é representado por:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{k=1}^4 \sum_{h=0}^{H+1} c_{f'e'kh} A_{i'i} \quad (\text{eq. 6})$$

$\forall_{f'} = 1, \dots, f$ ,  $f$ -ésima máquina disponível para a colheita na classe de inclinação  $i'$ ;

$\forall_{e'} = 1, \dots, e$ ,  $e$ -ésima tipo de equipe (ou operador) de colheita;

$\forall_{k} = 1, \dots, 4$ , semana em que ocorre a atividade de colheita.

As demais variáveis já foram definidas;

O custo da extração da madeira  $b_{l'o'f'e'k'h}$  com a máquina de baldeio  $l'$  pela equipe  $o'$ , na semana  $k'$  do mês  $h'$ , da madeira colhida na unidade operacional  $i'$  do talhão  $i$  com a máquina de colheita  $f'$  e operada pela equipe  $e'$  na semana  $k$  do mês  $h$  é representado por:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{l'=1}^l \sum_{o'=1}^o \sum_{k'=1}^4 \sum_{h'=0}^{H+1} b_{l'o'f'e'k'h'} A_{i'i} \quad (\text{eq. 7})$$

em que

$\forall_{l'} = 1, \dots, l$ ,  $l$ -ésima máquina disponível para o baldeio da área colhida na classe de inclinação  $i'$ ;

$\forall_{o'} = 1, \dots, o$ ,  $o$ -ésima tipo de equipe (ou operador) disponível para o baldeio;

$\forall_{k'} = 1, \dots, 4$ , semana em que ocorre a atividade de baldeio; e

$\forall_{h'} = 1, \dots, H + 1$ ,  $H$ -ésimo mês do horizonte de planejamento.

As demais variáveis já foram definidas.

A representação matemática do custo da atividade de transporte é dada pela seguinte formulação:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{l'=1}^l \sum_{o'=1}^o \sum_{k'=1}^4 \sum_{h'=0}^{H+1} \sum_{v'=1}^v \sum_{k''=1}^4 \sum_{t=0}^T t_{v'k''t' l'o'f'e's'h'} A_{i'i} \quad (\text{Eq. 8})$$

em que

$t_{v'k''t' l'o'f'e's'h'}$  é o transporte da madeira com o veículo  $v'$  na semana  $k''$  do mês  $t'$ , baldeado pela a máquina  $l'$  e equipe  $o'$ , na semana  $k'$  do mês  $h'$ , da madeira colhida na unidade operacional  $i'$  localizada no talhão  $i$  com a máquina de colheita  $f'$  e operada pela equipe  $e'$  na semana  $k$  do mês  $h$ ;

$\forall_{v'} = 1, \dots, v$ ,  $v$ -ésimo veículo disponível para o transporte;

$\forall_{k''} = 1, \dots, 4$ , semanas em que podem ocorre a atividade de transporte; e

$\forall_s = 0, \dots, S_{max}$ ,  $S_{max}$ -ésimo período de secagem permissível após a colheita;

$\forall_t = 0, \dots, T$ ,  $t$ -ésimo mês máximo que a madeira pode ficar no campo ( $T = H + S_{max}$ );

As demais variáveis já foram definidas.

O horizonte de planejamento pode ser limitado para unidades operacionais em períodos críticos, como por exemplo o agendamento da atividade de transporte em estradas com péssimas condições de conservação e da atividade de colheita em áreas com inclinação acentuada em período chuvoso. Assim, para algumas áreas os valores monetários das alternativas em períodos críticos não são incluídos na função objetivo do problema. Como consequência, a inclusão de impedimentos do agendamento das atividades de colheita, baldeio e transporte na unidade operacional  $i'$  para determinado período vai alterar a variação do período de ocorrência das atividades para esta unidade na formulação matemática do problema.

### 2.5.2 Restrições

As restrições para os planos operacionais variam conforme os objetivos e os recursos disponíveis de cada empreendimento. Nas equações abaixo, são apresentadas as formulações matemáticas das restrições o para o controle do fluxo e capacidade das operações:

▪ Restrição controle do fluxo de volume colhido:

- Fluxo mensal:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{h=0}^{H+1} VU_h A_{i'i} \geq D_h \quad (\text{eq. 9})$$

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{h=0}^{H+1} VU_h A_{i'i} \leq D_h \quad (\text{eq. 10})$$

- Fluxo semanal:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^4 VU_{kh} A_{i'i} \geq \frac{1}{4} D_h \quad (\text{eq. 11})$$

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^4 VU_{kh} A_{i'i} \leq \frac{1}{4} D_h \quad (\text{eq. 12})$$

em que

$VU_h$  é o volume úmido obtido com a colheita da área A da unidade  $i$  na classe de inclinação  $i'$  no período  $h$ ;e

$VU_{hs}$  é o volume da unidade operacional  $i'$  colhido na semana  $k$  do mês  $h$ . A demanda periódica da fábrica é expressão por  $D_h$ .

As demais variáveis já foram definidas.

▪ Restrição para o controle do fluxo de volume transportado:

- Fluxo mensal:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T VS_t A_{i'i} \geq D_h \quad (\text{eq. 13})$$

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T VS_t A_{i'i} \leq D_h \quad (\text{eq. 14})$$

- Fluxo semanal:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k''=1}^4 VS_{k''t} A_{i'i} \geq \frac{1}{4} D_h \quad (\text{eq. 15})$$

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k''=1}^4 VS_{k''t} A_{i'i} \leq \frac{1}{4} D_h \quad (\text{eq. 16})$$

em que

$VS_t$  é o volume, com unidade reduzida, transportado no mês  $t$ , obtido com a colheita da área  $A$  do talhão  $i$  na classe de inclinação  $i'$  na semana  $k'$  do mês  $h$ .

$VS_{k''t}$  é o volume transportado da unidade operacional  $i'$  na semana  $k''$  do mês  $t$ . A demanda periódica da fábrica é expressa por  $D_h$ .

As demais variáveis já foram definidas.

- Restrição para controle do fluxo estoque de madeira no pátio:

- Fluxo mensal:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T E_t \geq E_0 + \sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T VS_t A_{i'i} - \sum_{h=0}^{H+1} D_h \quad (\text{eq. 17})$$

em que

$E_t$ , é o estoque do pátio no período  $t$ ,  $VS_t$  é o volume, com unidade reduzida, transportado no mês  $t$ , obtido com a colheita da área  $A$  da unidade  $i$  na classe de inclinação  $i'$  na semana  $k'$  do mês  $h$ ;

$E_0$  é o estoque inicial da colheita realizada no ano anterior; e

$D_h$  é a demanda da fábrica.

As demais variáveis já foram definidas.

- Restrição de volume de corte máximo e mínimo por tipo de equipe:

- Equipe de colheita:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{k=1}^4 \sum_{h=0}^{H+1} VU_{f'e'kh} A_{i'i} \geq Cmin_{l'or'kh} \quad (\text{eq. 18})$$

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{k=1}^4 \sum_{h=0}^{H+1} VU_{f'e'kh} A_{i'i} \leq Cmax_{l'or'kh} \quad (\text{eq. 19})$$

em que

$VU_{f'e'kh}$  é o volume úmido colhido da área  $A$  da unidade operacional  $i'$  no talhão  $i$  com a máquina de colheita  $f'$  e operada pela equipe  $e'$  na semana  $k$  do mês  $h$ ;

$Cmin_{hk}$  é a capacidade mínima de baldeio  $k$  no mês  $h$  e

$Cmax_{hk}$  é a capacidade máxima.

- Equipe de baldeio:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{l'=1}^l \sum_{o'=1}^o \sum_{k'=1}^4 \sum_{h'=0}^{H+1} VU_{l'o'f'e'k'h'} A_{i'i} \geq \frac{1}{4} D_h \quad (\text{eq. 20})$$

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{l'=1}^l \sum_{o'=1}^o \sum_{k'=1}^4 \sum_{h'=0}^{H+1} VU_{l'o'f'e'k'h'} A_{i'i} \leq \frac{1}{4} D_h \quad (\text{eq. 21})$$

em que

$V_{f'e'k'h}$  é o volume baldeado com a máquina  $l'$  e a equipe  $o'$  no talhão  $i$  na classe de declividade  $i'$ , na semana  $k'$  do mês  $h'$ .

As demais variáveis já foram definidas.

As restrições que garantem a integridade da unidade operacional  $i'$  são listadas nas equações abaixo:

- Restrição para o corte inteiro da área:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n A_{i'i} \leq 1 \quad (\text{eq. 22})$$

- Restrição para o corte integral da área:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n A_{i'i} \leq A_{i'i} \quad (\text{eq. 23})$$

### 2.5.3 Resolução do problema

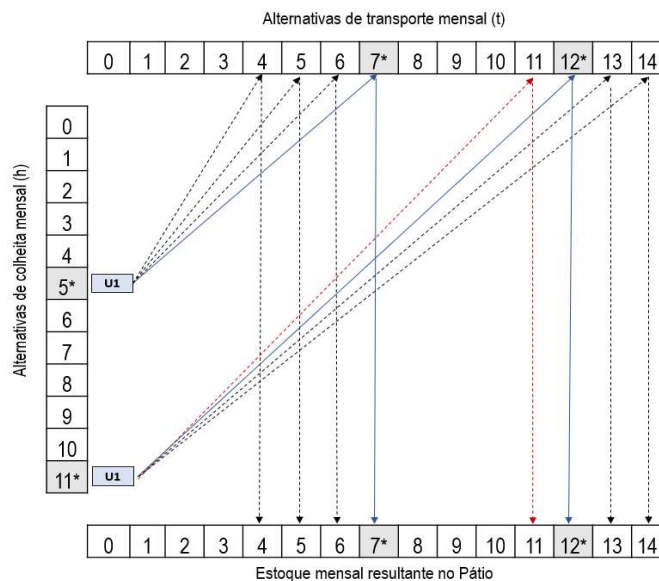
Detalhamento do plano operacional faz com que o problema de tomada de decisão seja do tipo NP-difícil. Assim para que pudesse ser resolvido por métodos da programação inteira o problema foi dividido para dois momentos durante o horizonte de planejamento:

Em um primeiro momento, foi calculada a média dos coeficientes das alternativas por equipe de colheita, baldeio e transporte por semana para cada unidade operacional. Essas médias semanais por estrato foram somadas para cada mês do horizonte planejamento. Assim, ao invés do exemplo ilustrado na Figura 6 representar o valor fluxo de caixa gerado pela a alternativa da equipe de colheita 1 e equipe baldeio 2, na semana  $k'$ , por exemplo, ela representa a média de todas as alternativas das atividades para cada unidade operacional mensalmente.

Ao gerar os coeficientes relacionados com a médias das alternativas, implica que o ganho volumétrico semanal com o ordenamento dos estratos é considerado desprezível. Para o planejamento do transporte, a curva de secagem utilizada foi obtida para cada mês, assim não

ocorre diferença volumétrica com a secagem entre as semanas por causa do intervalo de variação da informação fornecida para gerar as alternativas. Nos casos em que são utilizadas informações de curvas de secagem com  $s$  intervalos de variação, a cada prescrição de colheita e baldeio mensal gerada, são associados os  $s$  períodos alternativos para que ocorra a atividade de transporte.

Os resultados ótimos para a unidade operacional 1 e 2, por exemplo, referentes as atividades de colheita e baldeio ( $k'$ \*) e as atividades de transporte ( $k''$ \*) são ilustrados na Figura 7. Esse resultado define o mês no qual ocorrerá as atividades de colheita e extração da madeira, seguido do mês que ocorrerá o transporte da pilha de madeira. Os valores monetários ótimos obtidos se referem a soma dos valores ao se considerar um período menor (plano semanal ou diário). Assim ao invés de resolver o planejamento operacional do ano, considerando alternativas para um período semanal e diário, o que conduzia a um problema combinatorial de difícil resolução, o modelo foi reduzido para o problema mensal e a partir da recorrência do resultado ótimo em relação a qual mês cortar/extrair e transportar para cada unidade operacional, foram selecionadas as prescrições para determinação do tipo de máquina e equipe a serem utilizadas para realizar as atividades em cada área, considerando o intervalo de tempo semanal.



#### Legenda

- Unidade operacional colhida e baldeada (mês ótimo de colheita e baldeio);
- Alternativas de secagem;
- Alternativa ótima de secagem (Mês do transporte);
- Mês com impedimento no transporte.

Figura 7 – Esquema para a geração das prescrições de colheita e transporte para as unidades operacionais 1 e 2, considerando o horizonte de planejamento de 12 meses, com intervalo mensal e espera máxima de secagem de 4 meses.

No segundo momento do processo de resolução do problema, portanto, as alternativas de agendamento das equipes (máquina e tipo de operador) de colheita, baldeio e tipo de transporte semanais são associadas as unidades operacionais, com corte e extração agendadas para o período  $h^*$  e transporte agendado para o período  $t^*$ , conforme exemplificado na Figura 8. Para cada unidade operacional, são selecionadas alternativas semanais para as equipes de colheita ( $k$ ), baldeio ( $k'$ ) considerando as perdas de rendimento das atividades em cada área.

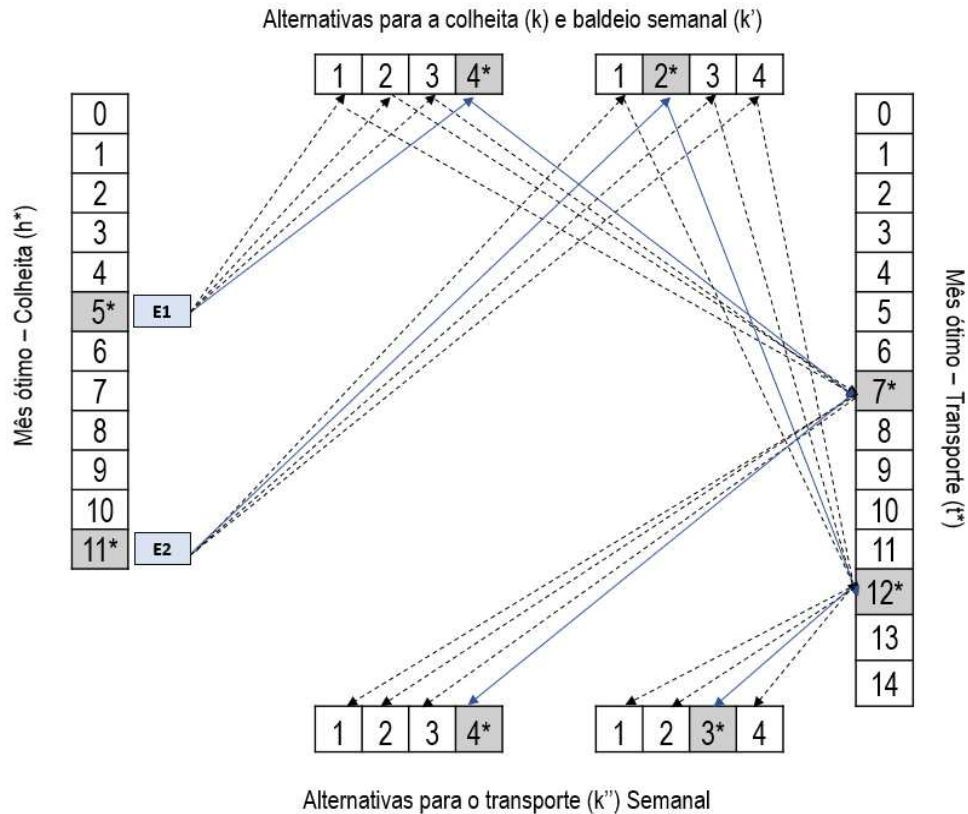


Figura 8 – Esquema para a geração das prescrições semanais para o sequenciamento das equipes de colheita, baldeio e caminhões para o transporte, nas unidades operacionais 1 e 2. O resultado ótimo para o ordenamento mensais das atividades nessas áreas foi definido na Figura 7.

Na Figura 8 é apresentado um esquetiza o processo de associação das alternativas para as equipes nos meses 5 e 11, nas unidades selecionadas para a corte e baldeio. A extração da pilha na área pode ocorrer na mesma semana da colheita, ou seja,  $k=k'$ , ou em períodos subsequentes,  $k'+1$ . Porém, para simplificar o estudo de caso, foi definido que o baldeio ocorreria na mesma semana da colheita, conforme exemplificado na Figura 8. No caso do transporte, podem ser associados as alternativas semanais de transporte, como por exemplo, tipo de caminhão e restrições considerando as dimensões dos mesmos. Porém, o planejamento semanal do transporte não foi considerado no estudo de caso.

A tendência nos planos imediatos é que as frentes de colheita e baldeio sempre se desloquem para as unidades vizinhas, com características operacionais semelhantes. Assim para que sequenciamento de corte e baldeio semanal fosse mais realístico, foram identificadas para cada modal de atividades, as unidades operacionais vizinhas nas quais as equipes poderiam se deslocar, determinando-se uma distância máxima permissível de deslocamento. Para este trabalho a distância máxima foi de 15 km, calculada a partir da distância euclidiana entre os centroides das áreas. Desta maneira, para cada alternativa de colheita na unidade operacional  $i$ , foram geradas  $j$  alternativas de deslocamento das frentes de colheita e baldeio, considerando unidades operacionais com características semelhantes a uma distância máxima. Assim, além do custo de colheita e baldeio, foi inserido na função objetivo, os custos gerados com as possibilidades de deslocamento das equipes de campo.

Nas unidades operacionais com área maior que a área máxima de corte semanal foi permitido o fracionamento dessa nas semanas. No caso de áreas menores que a capacidade de colheita semanal, foi inserida a restrição para o corte inteiro dessa dentro da semana. Assim, o modelo semanal, foi um modelo de programação inteira mista, com o objetivo de minimizar o custo total das atividades de colheita e balde. Nas equações a seguir é apresentada a formulação matemática da função objetivo para as atividades de colheita e baldeio, nessa etapa de resolução do problema:

- Deslocamento da equipe de colheita:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{k=1}^4 \sum_{h=0}^{H+1} c_{f'e'kh} A_{i'ij} \quad (\text{eq. 24})$$

em que

$c_{f'e'kh}$  é o custo de colheita da área  $A$  da unidade operacional  $i'$  no talhão  $i$  com a máquina de colheita  $f'$  e operada pela equipe  $e'$  na semana  $k$  do mês  $h$ , com a alternativa  $j$  de deslocamento entre as unidades operacionais considerando uma distância máxima permissível.

- Deslocamento para a equipe de baldeio:

$$\sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{f'=1}^f \sum_{e'=1}^e \sum_{l'=1}^l \sum_{o'=1}^o \sum_{k'=1}^4 \sum_{h'=0}^{H+1} b_{l'o'f'e'k'h'} A_{i'ij} \quad (\text{Eq. 25})$$

em que

$b_{f'e'kh}$  é o volume baldeado com a máquina  $l'$  e a equipe  $o'$  no talhão  $i$  na classe de declividade  $i'$ , na semana  $k'$  do mês  $h'$ , com a alternativa  $j$  de deslocamento entre as unidades operacionais considerando uma distância máxima permissível.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estratificação do talhão (lote, projeto entre outras) em unidades operacionais, em função da inclinação do terreno, permitiu definir alternativas de máquina disponível e tipo de operador considerando as curvas de rendimentos das atividades, de maneira mais específica. Esse desmembramento, torna o modelo matemático mais robusto em relação a programação das atividades. Assim, as áreas no talhão podem ter diferentes atividades programadas para diferentes períodos e intervalos de tempo (diário, semanal e mensal), no planejamento operacional.

A formulação matemática utiliza o modelo tipo III, desenvolvido por Garcia (1981). Esse modelo permitiu gerar a prescrições para diferentes atividades iniciando em diferentes períodos, porém respeitando o sequenciamento de ocorrência dessas. O desmembramento dos talhões em subáreas aumentou significativamente a quantidade de variáveis de decisão. Outra abordagem para simplificação do problema seria o agrupamento dessas subáreas em blocos com condições homogêneas em relação fatores que afetam o rendimento das atividades, como por exemplo, volume médio individual das árvores (VMI), tipo de solo, distância de extração e condição de estradas, considerando a distância máxima de deslocamento entre as unidades que o compõe. Dessa maneira, as alternativas seriam geradas para o bloco  $i$  na classe de inclinação  $i'$ , reduzindo o tamanho do modelo.

Na Tabela 2 e Figura 9 são apresentados os resultados para os planos de colheita, em  $m^3$  de volume úmido, e transporte em  $m^3$  de volume seco, obtidos a partir do resultado da otimização mensal das atividades integradas no tempo em função da curva de secagem. Foi considerada que a madeira transportada dos três primeiros meses do horizonte de planejamento é a madeira secando no campo, resultante da colheita do ano anterior. Nessa solução foram inseridas as restrições de atendimentos de colheita mensais mínimo e máximo. Para o cálculo do fluxo de madeira no pátio foi considerado estoque inicial de  $22.500 m^3$  e uma demanda mensal da fábrica  $27.000 m^3$ . O fluxo o estoque foi calculado da seguinte forma:  $E_t = VS_{t-1} + E_{t-1} - D_t$ .

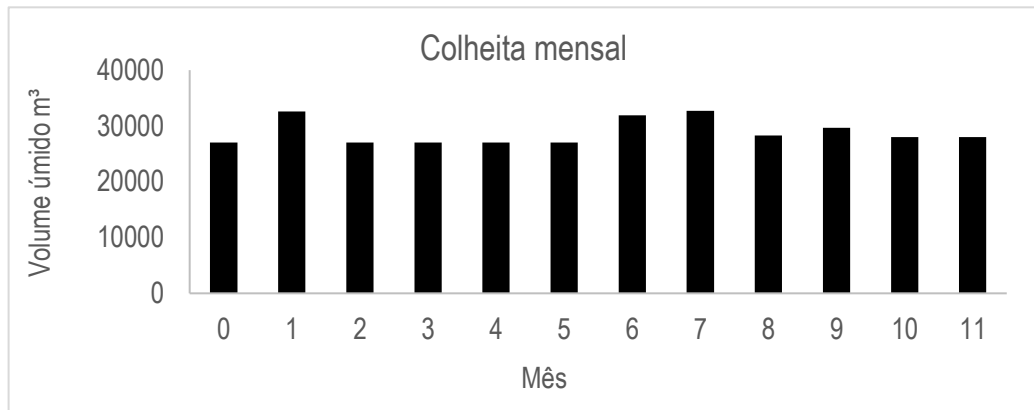
Tabela 2 – a) Plano de colheita, em m<sup>3</sup> de volume úmido; b) Plano de transporte, em m<sup>3</sup> de volume seco e c) Estoque no Pátio resultante, em m<sup>3</sup> de volume seco. Em que  $E_0$  é o estoque inicial do pátio, colhido no ano anterior

Mês	Colheita	Transporte	Estoque Final no Pátio
	Volume Úmido	Volume Seco	
0	27000,78	-	
1	32589,35	-	$E_0 = 22500$
2	27000,04	-	
3	27000,90	27000,78	22500,78
4	27008,97	32589,35	28090,13
5	27000,14	27000,04	28090,17
6	31893,40	42000,92	43091,09
7	32733,04	27008,97	43100,06
8	28266,82	42000,54	58100,60
9	29652,71	47892,44	78993,04
10	28000,74	33634,93	85627,97
11	28000,44	28000,74	86628,71
12	-	0,00	59628,71
13	-	0,00	32628,71
14	-	28000,44	33629,15
Total	346147,32	335129,15	

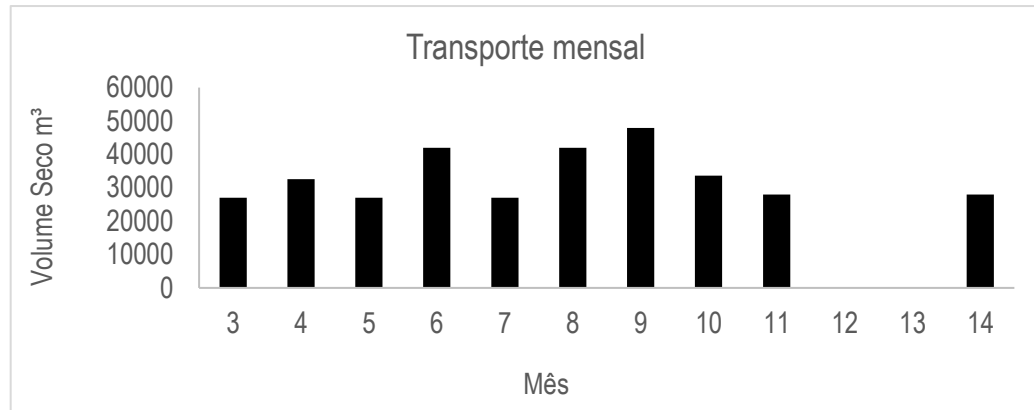
Apesar de nos meses 12 e 13 não ter ocorrido transporte de madeira, o estoque no pátio foi positivo em todo o horizonte de planejamento do transporte (Tabela 2). O resultado para a colheita atendeu a demanda mínima em todos os meses do horizonte de planejamento, com uma variação permissível de 20% além do mínimo preestabelecido, em alguns meses. Em consequência da integração das duas atividades, todo o volume teve ação de transporte associada, porém o volume transportado total foi 3,28% menor que o volume colhido devido a secagem no campo.

Nos meses que antecedem os períodos chuvosos, ocorreu uma maior concentração das atividades de transporte, por terem secagem mais acentuada de acordo com a Figura 5, o que leva a uma maior redução de volume úmido da madeira, reduzindo o custo do transporte. Essa concentração pode ser verificada nos meses 6, 8 e 9 na Tabela 2. Além disso, outro fator determinante para a concentração das atividades de transporte em períodos seco foi na própria formulação da instância empregada para o estudo de caso. Para gerar o problema foram eliminadas alternativas de colheita e transporte em áreas críticas o que resultou em menor quantidade de alternativas de solução para esses meses.

a)



b)



c)

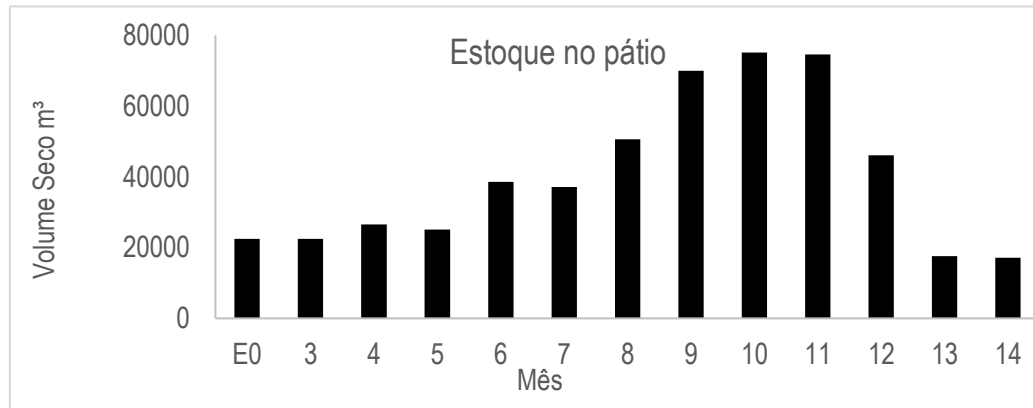


Figura 9 – a) Plano de colheita mensal, em m<sup>3</sup> de volume úmido; b) Plano de transporte mensal, em m<sup>3</sup> de volume seco e c) estoque no pátio resultante, em m<sup>3</sup> de volume seco, em que E<sub>0</sub> é o estoque inicial do pátio, colhido no ano anterior.

Apesar dos meses 12 e 13 não ocorrer transporte, o estoque no pátio foi positivo em todo o horizonte de planejamento do transporte (Tabela 2). No caso da necessidade de atendimento de contratos para o transporte terceirizado, podem ser inseridas as restrições 13 e 14 nos meses em que os limites mínimos e máximos foram violados, ou até mesmo, a inclusão

de penalidade, com maximização e/ou minimização dos desvios, por meio da programação por metas. Porém, não foi o objetivo deste estudo, uma vez que a inclusão das restrições depende dos objetivos de cada problema em questão.

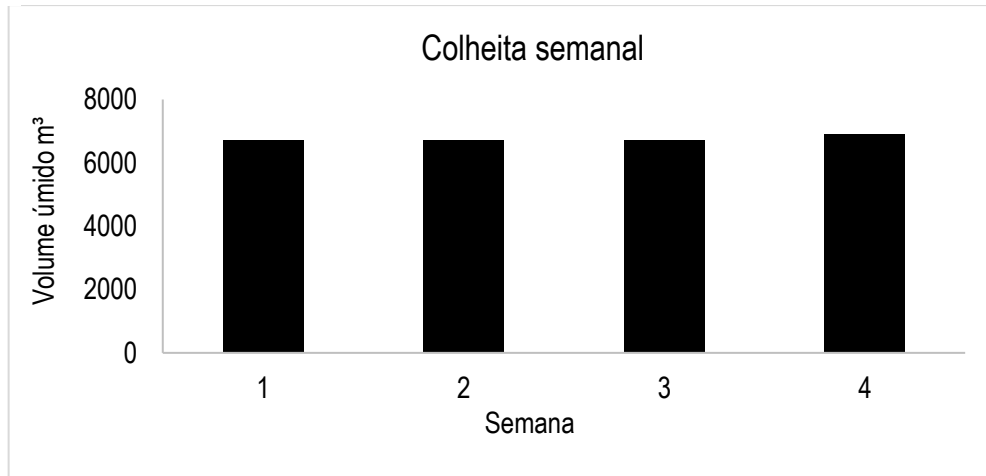
O volume estocado no pátio foi determinado a partir do atendimento da demanda do mensal da colheita. Na Figura 9c pode ser verificada uma maior concentração de estoque nos meses 9, 10 e 11 devido a concentração das atividades de transporte nos meses do período seco. Quanto o objetivo é a regulação do fluxo de estoque no pátio, esta pode ser incluída no modelo com a formulação da equação 17. Assim, tanto o transporte, quanto a colheita são planejados com o objetivo de manter o estoque regulado para a empresa.

Muitas vezes, os plantios selecionados para o corte em determinado ano ainda não alcançaram o máximo incremento médio anual, devido a imposição de restrições de regulação da produção para o planejamento estratégico. A inclusão do crescimento mensal para o ordenamento do planejamento operacional foi estudada no trabalho de Santos (2014), no qual foi verificado que em unidades com taxas de crescimento significativo no ano de corte, a tendência é que colheita seja postergada para os últimos períodos do plano. O contrário ocorre nas unidades com baixa capacidade produtiva, nas quais a tendência é que as atividades de colheita sejam agendadas para o início do ano.

A maioria dos modelos para a otimização no nível operacional tem focado somente em minimização dos custos de colheita, baldeio e transporte. Exemplos podem ser encontrados nos trabalhos de Beaudoin et al. (2008), Bredström et al. (2010) e Roscher et al. (2013). No caso da maximização de receita líquida, geralmente são utilizadas taxas de crescimento fixa no ano para gerar as alternativas de colheita (BANHARA et al., 2010; DEMS et al., 2017). A abordagem considerando os possíveis ganhos em produção, permite que a decisão para a agendamento das atividades à nível operacional não leve em consideração somente o ganho em receita líquida devido a redução do custo, mas que também inclua os possíveis ganhos em volume ao longo do ano, ao postergar o corte das unidades mais produtivas.

Para a validação do modelo semanal da colheita e baldeio foram selecionadas as unidades operacionais com resultado ótimo para o mês 4. Os resultados para a regulação do fluxo de volume e área semanais, considerando as restrições em relação a capacidade máxima baldeio semanal, são apresentados na Figura 10.

a)



b)

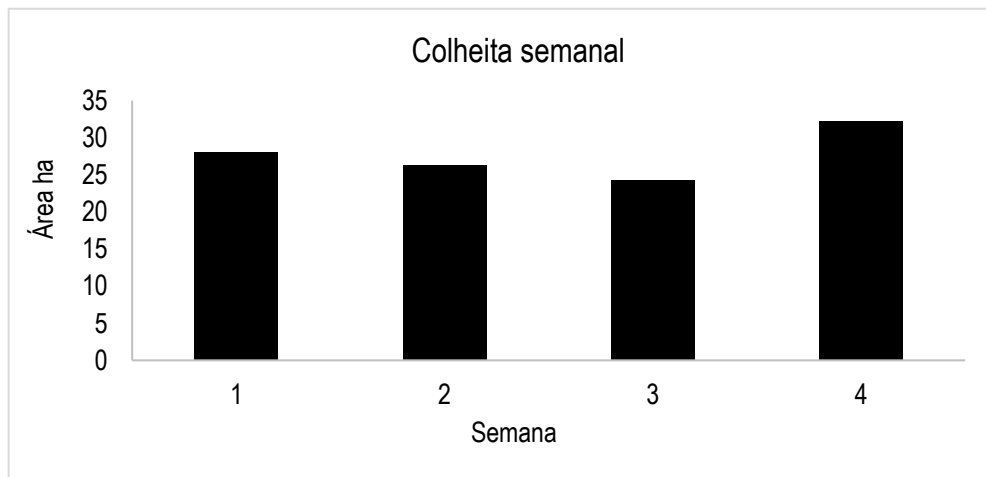


Figura 10 – Plano de colheita e baldeio semanal; a) volume úmido, em m<sup>3</sup>; b) área, em ha.

A capacidade de baldeio foi dimensionada em função do volume ótimo definido para o corte no mês 4; e este por sua vez foi determinado em função da demanda da fábrica. Na Figura 10, pode ser observado que a demanda da colheita e extração semanal foi atendida em todos os períodos em que foram impostas as restrições das equações 15 e 16. O resultado semanal, respeitou a solução ótima obtida para o plano mensal nos diferentes níveis temporais das restrições.

O ideal é que na modelagem do baldeio e transporte seja levada em consideração a redução do volume com secagem semanal do campo. Porém, para simplificar o estudo de caso, foi considerado que o baldeio ocorreu na mesma semana que a colheita. Ao incluir a variação volumétrica em função da secagem da madeira para a geração e alternativas de baldeio, é possível aumentar o rendimento das atividades de extração em função da redução do peso úmido da madeira. Os custos da extração da madeira no campo, portanto, podem ser calculados

da mesma forma que os custos de transporte mensal, levando em consideração a redução da unidade em função do tempo.

Uma vez que o modelo considera a distância entre as unidades operacionais, o fracionamento das áreas resultou em custo zero de deslocamento das frentes de colheita entre as áreas de uma mesma unidade operacional. Os resultados para a alocação das máquinas e equipes nas unidades operacionais são apresentados na Tabela 3. Para cada tipo de equipe de colheita e baldeio foram associados a perda de rendimento das atividades, e esses foram distribuídos de forma uniforme nas semanas (Figura 10). Assim, é possível alocar os operadores das máquinas nas áreas nas quais as perdas de rendimento destas atividades já foram previamente determinadas.

Tabela 3 – Resultado da otimização semanal para o ordenamento das equipes colheita e baldeio no campo

Semana	Colheita			Baldeio			Volume (m <sup>3</sup> )	Área (ha)
	Inclinação	Máquina	Equipe	Inclinação	Máquina	Equipe		
1	<27%	HV	E1	<27%	FW	E2	3.737,28	16,1256
1	<27%	HV	E2	<27%	FW	E1	1.472,13	4,9907
1	<27%	HV	E3	<27%	FW	E3	1.369,84	5,7824
1	<35%	FB*	E2	<35%	SK	E1*	11,19	0,1205
1	<35%	FB*	E3	<35%	SK	E1*	27,32	0,1496
1	<35%	HV*	E1	<35%	FW	E2*	22,58	0,3328
2	<27%	HV	E1	<27%	FW	E3	4.242,74	17,0638
2	<27%	HV	E2	<27%	FW	E1	1.480,48	4,9907
2	<27%	HV	E3	<27%	FW	E1	1.486,19	5,3869
2	<35%	FB*	E1	<35%	SK	E1*	6,60	0,0751
2	<35%	FB*	E2	<35%	SK	E1*	10,62	0,1005
2	<35%	FB*	E3	<35%	SK	E1*	10,66	0,1127
3	<27%	HV	E1	<27%	FW	E3	3.641,15	23,9575
3	<27%	HV	E2	<27%	FW	E1	1.489,45	4,9907
3	<27%	HV	E3	<27%	FW	E1	1.489,45	4,9907
4	<27%	HV	E1	<27%	FW	E3	3.514,35	11,7085
4	<27%	HV	E2	<27%	FW	E1	1.497,99	4,9907
4	<27%	HV	E3	<27%	FW	E1	1.497,99	4,9907
Total Geral							27.008,97	110,8637

\* Máquinas com guinchos acoplados; E1, E2, E3 curvas de rendimento das equipes no campo; HV é a máquina *Harvester*; FB é a *Feller Buncher*; FW é a *Forwarder*; e a Sk é a máquina *Skidder*.

A restrição de singularidade de equipe deve ser imposta nas áreas as quais tem possibilidade de serem fracionadas na semana, caso contrário, o modelo irá programar diferentes equipes para a colheita e baldeio nas frações de área da mesma unidade operacional. Nos resultados da Tabela 3 foram incluídas na formulação as restrições das equações 18, 19 as quais determinam que todos os tipos de equipe de colheita tenham atividades programadas para

as semanas. Para a atividade de baldeio, as restrições 20 e 21 foram impostas somente na primeira semana, nas demais ocorreu a tendência de combinar equipes com alto (E1) e baixo (E1) rendimento para o atendimento da demanda semanal.

O ordenamento do transporte da madeira, no estudo de caso, foi realizado somente em nível mensal, considerando que todo o transporte seria realizado pelo caminhão Bitrem. Porém o modelo permite que sejam considerados caminhões com diferentes capacidades de transporte para as alternativas semanais; e que suas dimensões sejam inseridas como restrições para cada semana. Assim, o sequenciamento do transporte pode ser sequenciado da mesma forma que resultados da Tabela 3, para o ordenamento das máquinas e equipes de colheita e baldeio.

## 4 CONCLUSÕES

- O modelo matemático proposto é realista e permite compor as diferentes fases temporais e espaciais do planejamento operacional;
- A curva de secagem da madeira permitiu integrar o horizonte de planejamento das atividades de colheita, baldeio e transporte;
- O modelo proposto neste estudo contempla as diferentes atividades do fluxo de aquisição de madeira, de forma genérica, podendo, com simples modificações, se adequar a situações específicas das empresas florestais.
- O particionamento do problema considerando a informação agregada para o período mensal, e desagregada para a semana, permite a resolução do problema de planejamento operacional da colheita e transporte com a programação inteira mista.

## 4 CONCLUSÕES GERAIS

A abordagem de modelagem proposta neste estudo é realista, permitindo a simulação de diferentes cenários de planejamento operacional da colheita, em nível mensal ou semanal, podendo ser estendida para o planejamento diário.

As informações mais impactantes para a complexidade do modelo de planejamento operacional da colheita, em nível semanal, são a projeção do volume semanal e a curva de secagem da madeira.

Apesar da simplificação do estudo de caso ele foi suficiente para demonstrar a aplicabilidade do modelo matemático proposto no estudo.

A resolução do modelo proposto pode ser feita empregando algoritmos exatos, porém, no caso de expansão do modelo para nível diário pode ser necessário o emprego de métodos heurísticos.

O referencial teórico apresentado no capítulo 1 demonstra que a modelagem matemática do problema de planejamento operacional até a condução deste estudo era incipiente, o contrário ocorrendo em relação ao planejamento estratégico.