

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO HENRIQUE BELAVENUTTI MARTINS DA SILVA

**PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA COLHEITA FLORESTAL POR BLOCOS E
TALHÕES INTEGRADO À REDE DE ESTRADAS**

CURITIBA

2015

PEDRO HENRIQUE BELAVENUTTI MARTINS DA SILVA

**PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA COLHEITA FLORESTAL POR BLOCOS E
TALHÕES INTEGRADO À REDE DE ESTRADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador:
Professor Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador:
Professor Dr. Gustavo Valentim Loch

CURITIBA

2015

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

Silva, Pedro Henrique Belavenutti Martins da
Planejamento otimizado da colheita florestal por blocos e talhões integrado à
rede de estradas / Pedro Henrique Belavenutti Martins da Silva. – Curitiba, 2015.
71 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa:
Curitiba, 20/11/2015.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Colheita florestal – Processo decisório. 2. Estradas florestais – Projetos e
construção. 3. Programação linear. 4. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Loch,
Gustavo Valentim. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9


CDU – 634.0.31


PARECER

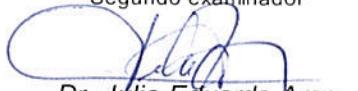
Defesa nº. 1131

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) mestrando(a) *Pedro Henrique Belavenutti Martins da Silva* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA COLHEITA FLORESTAL POR BLOCOS E TALHÕES INTEGRADO À REDE DE ESTRADAS**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Mestre* em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.




Dr. Cassius Tadeu Scarpin
Universidade Federal do Paraná
Primeiro examinador


Dr. Afonso Figueiredo Filho
Universidade Federal do Paraná
Segundo examinador


Dr. Julio Eduardo Arce
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 20 de novembro de 2015.


Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Matrícula UFPR 114430

Aos meus pais, dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Julio Eduardo Arce, pela nobre oportunidade, excelente orientação e amizade.

Ao Prof. Gustavo Valentim Loch, pela co-orientação e valioso compartilhamento.

À empresa Klabin S/A, por disponibilizar os dados utilizados neste estudo, nas pessoas de Andreia Pimentel, Cristiane de L. Eisfeld, Darlon O. de Souza, Diego P. Cezana, Jairo Woruby, Johnatan S. Correia e Reinaldo J. Correia; e os demais colegas da empresa pela atenção e apoio prestados.

Aos amigos e familiares que estiveram presentes durante a realização deste trabalho, contribuindo com conhecimentos diversos e apreço.

A Deus, por tudo.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo formular modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) como suporte à tomada de decisões de planejamento tático da colheita em plantações florestais industriais. Foram formulados modelos de colheita por blocos e talhões, minimizando os custos das atividades de colheita e manutenção da rede de estradas florestal envolvida, sujeitos a restrições de geração de caminhos de escoamento da produção madeireira a partir das unidades de manejo até a rodovia pavimentada por meio da aplicação do algoritmo de otimização em redes Floyd-Warshall, além de restrições de atendimento das metas de produção estabelecidas. O horizonte de planejamento foi de cinco anos com periodicidade anual e a área do estudo corresponde a cerca de 24.000 hectares de reflorestamento de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., pertencentes à empresa Klabin S.A., localizada no município de Telêmaco Borba, Paraná. Foram simulados nove cenários com diferentes níveis de fragmentação espacial da colheita e com variações nas idades mínimas de corte das unidades de manejo. Adicionalmente, um último cenário representando um plano tático de colheita fornecido pela empresa foi gerado. Os cenários foram avaliados pelos seguintes parâmetros de desempenho: rendimento das unidades de manejo agendadas para colheita, extensão da rede de estradas utilizada e custo de produção. Os resultados demonstraram que a concentração espacial da colheita por blocos diminui a quantidade de estradas utilizada, mas diminui também o rendimento produtivo médio das unidades de manejo, ao contrário dos modelos por talhões que fragmentam a colheita utilizando mais estradas, mas optam por colher unidades de manejo mais produtivas em média. A diminuição da idade mínima de corte pode piorar o rendimento médio das unidades de manejo agendadas para colheita mas aumenta também a quantidade de estradas utilizada. O custo de produção em todos os cenários simulados foi melhor que o plano tático fornecido pela empresa, demonstrando a eficiência dos modelos formulados em otimizar os planos táticos de colheita florestal.

Palavras-Chave: Manejo florestal, Agendamento da colheita, Construção de estradas, Programação linear.

ABSTRACT

This work aims to formulate a mixed integer linear program (MILP) as a decision support in tactical harvest planning of industrial forest plantations. Models were formulated by harvest blocks and unit managements, minimizing the costs of harvesting activities and road network involved subjected to wood path generation restrictions from management units to the paved highway through the implementation of Floyd-Warshall network optimization algorithm, in addition to attendance of goals productions restrictions. The planning horizon was five years on annual periods and the study area comprises about 24.000 hectares composed by *Eucalyptus* spp. and *Pinus* spp. reforestations, belonging to Klabin S.A Company, located in Telêmaco Borba, Paraná. Nine scenarios were generated with different level of spatial harvest fragmentations and with minimal cutting ages variations of management units, additionally one last scenario representing a tactical harvest plan offered by company was generated. The scenarios were evaluated by the followed performance parameters: management unit yield scheduled to be harvested, road network extension and production costs. The results demonstrated that the harvest spatial concentration by blocks decrease the amount of used roads but also decrease the average productive yield of management units, unlike the models by stands that break up the harvest using more roads but choose management units average more productive to harvest. The decrease of minimal harvest yields may get worse the average yield of unit managements scheduled to be harvested but also increases the amount of used roads. The production cost in all simulated scenarios were better them tactical plan offered by company demonstrating the formulated models efficiency to optimize tactical harvest planning.

Keywords: Forest management, Harvest Scheduling, Road construction, Linear programming.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – RESPONSABILIDADES DO MACRO E MICROPLANEJAMENTO FLORESTAL	20
FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
FIGURA 3 – METAS DE PRODUÇÃO IMPOSTAS POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO E PRODUTO CONSIDERADO	34
FIGURA 4 – REDE DE ESTRADAS PRINCIPAL, RODOVIA PAVIMENTADA, PONTOS DE INTERSECÇÃO E TALHÕES CONTIDOS NA ÁREA DE ESTUDO	36
FIGURA 5 – MAPA DA CONSTITUIÇÃO DE UM BLOCO DE COLHEITA PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO	39
FIGURA 6 – QUADRO DOS MODELOS PROPOSTOS	40
FIGURA 7 – ÁREAS DE COLHEITA POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO, CENÁRIOS AVALIADOS E ÁREA TOTAL DE COLHEITA.....	49
FIGURA 8 – PRODUÇÃO DE <i>Eucalyptus</i> spp. E <i>Pinus</i> spp. POR CENÁRIO AVALIADO	50
FIGURA 9 – DESEMPENHO PRODUTIVO DE <i>Eucalyptus</i> spp. E <i>Pinus</i> spp. POR CENÁRIO ANALISADO	51
FIGURA 10 – IDADE MÉDIA DE CORTE DE <i>Eucalyptus</i> spp. E <i>Pinus</i> spp. POR CENÁRIO ANALISADO	52
FIGURA 11 – INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) COMERCIAL DE <i>Eucalyptus</i> spp. E <i>Pinus</i> spp. POR CENÁRIO ANALISADO.....	53
FIGURA 12 – DESEMPENHO DO INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) COMERCIAL DE <i>Eucalyptus</i> spp. E <i>Pinus</i> spp. POR CENÁRIO ANALISADO.....	53
FIGURA 13 – SOMA ACUMULADA DA QUANTIDADE DE ESTRADAS PRINCIPAIS POR CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO	55
FIGURA 14 – QUANTIDADE DE PRODUÇÃO MADEIREIRA POR METRO DE ESTRADA PRINCIPAL REFORMADA EM FUNÇÃO DO TIPO DE MODELO UTILIZADO E DAS VARIAÇÕES DE IDADES MÍNIMAS DE CORTE DE <i>Eucalyptus</i> spp. E <i>Pinus</i> spp.	56
FIGURA 15 – AGENDAMENTO DA COLHEITA DOS CENÁRIOS 7 E 3	57

FIGURA 16 – SOMA ACUMULADA DA DISTÂNCIA TOTAL DOS RAMAIS POR CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO	58
FIGURA 17 – AGENDAMENTO DA COLHEITA DOS CENÁRIOS 2 E 8	60
FIGURA 18 – COMPORTAMENTO DO CUSTO UNITÁRIO DE PRODUÇÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE MODELO UTILIZADO E DAS IDADES MÍNIMAS DE CORTE DE <i>Eucalyptus</i> spp. e <i>Pinus</i> spp.	63
FIGURA 19 – AGENDAMENTO DA COLHEITA DOS CENÁRIOS 1 E 6	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA EM RELAÇÃO AO GÊNERO <i>Pinus</i>	32
TABELA 2 – ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA EM RELAÇÃO AO GÊNERO <i>Eucalyptus</i>	32
TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO DOS SORTIMENTOS	33
TABELA 4 – PRODUTOS CONSIDERADOS NO PLANEJAMENTO TÁTICO DA EMPRESA.....	33
TABELA 5 – DEMANDA ANUAL DE PRODUÇÃO POR PERÍODO E PRODUTOS CONSIDERADOS, EM MILHARES DE TONELADAS	34
TABELA 6 – ESTRUTURA DOS 9 CENÁRIOS DE OTIMIZAÇÃO FLORESTAL SIMULADOS NO ESTUDO	45
TABELA 7 – RESUMO DAS DIMENSÕES E DOS RESULTADOS DOS CENÁRIOS SIMULADOS	46
TABELA 8 – ÁREA DE COLHEITA DE <i>Eucalyptus spp.</i> e <i>Pinus spp.</i> POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO E TOTAL, PARA CADA CENÁRIO, EM HECTARES.....	48
TABELA 9 – SOMA DAS DISTÂNCIAS DOS TRECHOS DE ESTRADAS PRINCIPAIS REFORMADOS EM CADA CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO, EM QUILOMETROS.....	54
TABELA 10 – RAZÃO ENTRE A PRODUÇÃO MADEIREIRA E A QUANTIDADE DE ESTRADAS PRINCIPAIS REFORMADAS POR CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO EM TONELADAS/METRO	55
TABELA 11 – SOMA DAS DISTÂNCIAS DOS RAMAIS CONSTRUÍDOS POR CENÁRIO SIMULADO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO, EM QUILOMETROS.....	58
TABELA 12 – RAZÃO ENTRE A PRODUÇÃO MADEIREIRA E A DISTÂNCIA TOTAL DOS RAMAIS CONSTRUÍDOS POR CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO, EM TONELADAS/METRO	59

TABELA 13 – CUSTO TOTAL, DE COLHEITA, DAS ESTRADAS PRINCIPAIS, DOS RAMAIS E AS INFLUÊNCIAS PERCENTUAIS NO TOTAL DOS CENÁRIOS	61
TABELA 14 – VALOR DO PROJETO, PRODUÇÃO TOTAL, CUSTO UNITÁRIO DE PRODUÇÃO E A VARIAÇÃO À TESTEMUNHA	62

LISTA DE ABRAVIATURAS

HP	- Horizonte de Planejamento
IMA	- Incremento Médio Individual
IRPM	- Modelos de Recursos Integrados de Manejo Florestal
N	- Número de árvores por hectare
PL	- Programação Linear
PLIM	- Programação Linear Inteira Mista
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
vmi	- volume médio individual
UM	- Unidade de Manejo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 PLANEJAMENTO FLORESTAL HIERÁRQUICO	18
2.2 PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL	20
2.3 AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL	23
2.4 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO	24
2.4.1 Problemas de planejamento tático da colheita florestal	24
2.4.2 Programação Linear	25
2.4.3 Métodos Heurísticos	26
2.5 ALGORITMOS DE CAMINHOS MÍNIMOS	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 ÁREA DE ESTUDO	30
3.2 AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL	31
3.2.1 Caracterização do problema	31
3.2.2 Estrutura inicial da floresta	31
3.2.3 Definição das metas de produção	33
3.2.4 Custos operacionais envolvidos	35
3.2.4.1 <i>Colheita</i>	35
3.2.4.2 <i>Manutenção de estradas</i>	35
3.3 MÉTODO DE GERAÇÃO DE CAMINHOS DE ESCOAMENTO DA PRODUÇÃO	37
3.4 BLOCOS DE COLHEITA	38
3.5 MODELOS PROPOSTOS	39

3.5.1	Formulação Matemática	41
3.6	CENÁRIOS PROPOSTOS.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	RESULTADOS COMPUTACIONAIS	46
4.2	ANÁLISE DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO.....	47
4.2.1	Rendimento dos talhões agendados para colheita	48
4.2.1.1	<i>Área de colheita e produção.....</i>	<i>48</i>
4.2.1.2	<i>Idade média e Incremento Médio Anual (IMA) comercial</i>	<i>51</i>
4.2.2	Rede de estradas utilizada	54
4.2.2.1	<i>Extensão da rede de estradas principais reformadas.....</i>	<i>54</i>
4.2.2.2	<i>Extensão da soma dos ramais de acesso construídos.....</i>	<i>58</i>
4.2.3	Análise de custos.....	60
4.2.3.1	<i>Custo total</i>	<i>60</i>
4.2.3.2	<i>Custo unitário de produção.....</i>	<i>61</i>
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal do Brasil, mais especificamente o de florestas plantadas, é um dos mais competitivos em nível mundial e desempenha um papel importante no cenário socioeconômico do País, contribuindo com a produção de bens de serviço, geração de empregos e promoção do desenvolvimento ambiental sustentável. Contudo, para que seja mantido o seu crescimento e sua competitividade é necessário superar os desafios atuais e futuros (ABRAF, 2012).

Ao longo das últimas décadas, os problemas de gestão florestal têm se tornado ainda mais complexos, devido à preocupação com a sustentabilidade dos ecossistemas, fundada em aspectos ambientais, econômicos e sociais, tornando-se também crescente a necessidade de desenvolver meios eficazes pelos quais se possa atender à demanda do mercado por produtos oriundos das florestas plantadas (ERIKSSON, 2014).

Para tanto, a colheita é tida como item de destaque no processo de produção florestal, planejada de forma que a agenda de corte dos talhões atenda as metas de produção com bom rendimento operacional. Entre os principais fatores que contribuem no rendimento operacional da colheita florestal são a produção dos talhões e a dispersão colheita, considerando o deslocamento da frente de corte e o transporte da produção madeireira.

Deste modo, na geração de planos de colheita se requer uma quantidade substancial de informações, incluindo informações de crescimento e produção florestal, distribuição espacial dos talhões, rendimento operacional, bem como informações sobre a rede de estradas envolvida.

O planejamento da rede de estradas florestais é parte integrante do planejamento da colheita. Por isso, decisões sobre construção, manutenção e desativação de estradas podem ser bastante complexas. Os procedimentos computacionais de otimização da colheita incluindo a rede de estradas florestais diminuem o orçamento e o impacto ambiental da atividade. Essas ferramentas matemáticas permitem gerar cenários para a área em questão, fornecendo informações importantes para apoiar as tomadas de decisões (MCDILL, 2014).

Usualmente esses modelos de otimização são formulados com uso da Programação Linear Inteira Mista (PLIM) nos quais as variáveis inteiras de decisão representam as opções de corte dos talhões individualmente ou dos grupos de talhões

adjacentes, além das opções de construção dos trechos de estrada envolvidos. O problema consiste em estabelecer uma agenda de corte das unidades de manejo envolvendo os trechos de estradas necessários no acesso, dentro de um período de tempo especificado. Nas formulações, geralmente o objetivo é maximizar os lucros atendendo a uma demanda volumétrica especificada.

Portanto, a partir de um problema específico de planejamento da colheita, e de posse das informações de interesse, é possível automatizar a geração de planos que considerem de forma integrada a rede de estradas e os demais fatores de rendimento e de dispersão da colheita, por meio da formulação de distintos modelos de PLIM.

Automatizar os planos de colheita integrados poderá representar uma grande economia de recursos para as empresas do setor, diminuir os custos de produção madeireira, bem como aumentar a eficiência das operações.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo foi formular, resolver e comparar modelos de Programação Linear Inteira Mista, como ferramentas de suporte à tomada de decisões de planejamento tático da colheita em plantações industriais de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. Como objetivos específicos, têm-se:

- Formular modelos de colheita florestal por blocos e talhões, objetivando minimizar a soma dos custos das atividades de colheita e dos custos relacionados à manutenção da rede de estradas florestais envolvida;
- Incorporar restrições de geração de caminhos de escoamento da produção madeireira e de atendimento das metas de produção estabelecidas;
- Avaliar os modelos formulados em diferentes cenários, sujeitos a diferentes níveis de fragmentação espacial da colheita e a variações nas idades mínimas de corte das unidades de manejo;
- Comparar os resultados gerados pelos cenários com o plano tático de colheita fornecido pela empresa, segundo parâmetros de desempenho verificados durante os períodos de avaliação.

1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Os modelos serão testados apenas em um problema específico de planejamento da colheita florestal, generalizações devem ser feitas com reservas. A ênfase recai sobre uma extensa área de reflorestamento, onde é analisado a relação da produção florestal e quantidade de estradas envolvidas no custo de produção, considerando-se somente a possibilidade de reforma dos trechos de estradas principais já existentes. Não foram mensurados e integrados diretamente todos os fatores influentes nos custos de reforma dos trechos de estradas principais, como a condição em que se encontra o trecho de estrada e a quantidade de produção que será escoada no período analisado. Adicionalmente, os equipamentos disponíveis e a produtividade das frentes de corte não foram considerados de forma direta.

Com relação à outra limitação deste trabalho, temos o tempo de processamento necessário para obtenção de soluções inteiras próximas da melhor existente, que cresce na medida que se aumenta o número de trechos de estrada, unidades de manejo e períodos de planejamento, retratados por variáveis inteiras de decisão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PLANEJAMENTO FLORESTAL HIERÁRQUICO

O planejamento pode ser descrito como um item administrativo que possui a função de se antecipar e definir as atividades a serem realizadas, os locais, os períodos, as técnicas empregadas e as pessoas encarregadas, de acordo com as exigências dos problemas (MACHADO et al., 2002).

Os processos de tomada de decisões de planejamento florestal nas grandes companhias são tradicionalmente organizados por uma estrutura hierárquica composta por diferentes níveis. Estes níveis de hierarquia são denominados de planejamento estratégico, tático e operacional (ANDRESON, 2005; KANGAS et al., 2008).

Devido aos longos ciclos de corte e envolvimento de grandes áreas de terras ocupadas por plantações florestais, alguns objetivos do planejamento só podem ser alcançados delineando-se estratégias em grandes escalas temporais. Estas decisões podem ser tomadas sem abordar precisamente como cada unidade de manejo será gerida, sendo um processo de responsabilidade do planejamento estratégico (MCDILL, 2014; MITCHELL, 2004).

No planejamento tático e operacional os períodos de tempo considerados são menores, isso não significa que eles são menos complexos, pois são consideradas informações mais detalhadas e na medida em que é possível incorporá-las no processo de tomada de decisões, aumenta-se a complexidade do problema (MCDILL, 2014; MITCHELL, 2004).

Uma característica interessante do planejamento hierárquico é que todos os planos partem do período atual, se diferenciando na resolução e precisão do primeiro período e na duração dos outros períodos do horizonte de planejamento (MCDILL, 2014; MITCHELL, 2004).

Embora quase todas as decisões tomadas pela organização estejam de alguma forma inter-relacionadas, o planejamento ocorre em diferentes níveis e com diferentes graus de detalhamento. Dessa forma é preciso que haja uma certa interação entre os níveis de planejamento, ainda que o mesmo possa ser feito de forma independente (MCDILL, 2014).

As informações devem fluir nos diferentes níveis de planejamento para que sejam definidas metas e objetivos concretos. Isso significa dizer que as metas estratégicas necessitam da condução efetuada pelo planejamento tático e operacional. No entanto para que os planos estratégicos possam ser viáveis, eles precisam estar ao alcance das capacidades táticas e operacionais. Determinar como relacionar de forma eficaz os diferentes níveis de planejamento já é por si mesmo um importante problema de planejamento (MCDILL, 2014).

No planejamento florestal, as decisões estratégicas se relacionam com à sustentabilidade dos empreendimentos, relacionando a definição de metas volumétricas de colheita em longo prazo, potencialmente por espécie e tipo de produto, bem como a distribuição por classes de idade da floresta futura. Devido à grande abrangência em superfície florestal e horizonte de planejamento acima de dez anos, pode não ser viável incluir a relação espacial entre as unidades de manejo, os locais de extração, rede de estradas, etc. (ANDERSSON, 2005; MCDILL, 2014; WEINTRAUB, 1996).

No nível tático, as questões são pertinentes às práticas de manejo nos compartimentos da floresta para atingir as metas obtidas a partir de um modelo estratégico (MCDILL, 2014). O horizonte de planejamento é em torno de cinco anos, dividido em períodos anuais ou mensais, de acordo com os objetivos delineados (CHURCH, R. L. et al., 1998; BASKENT E KELES, 2005).

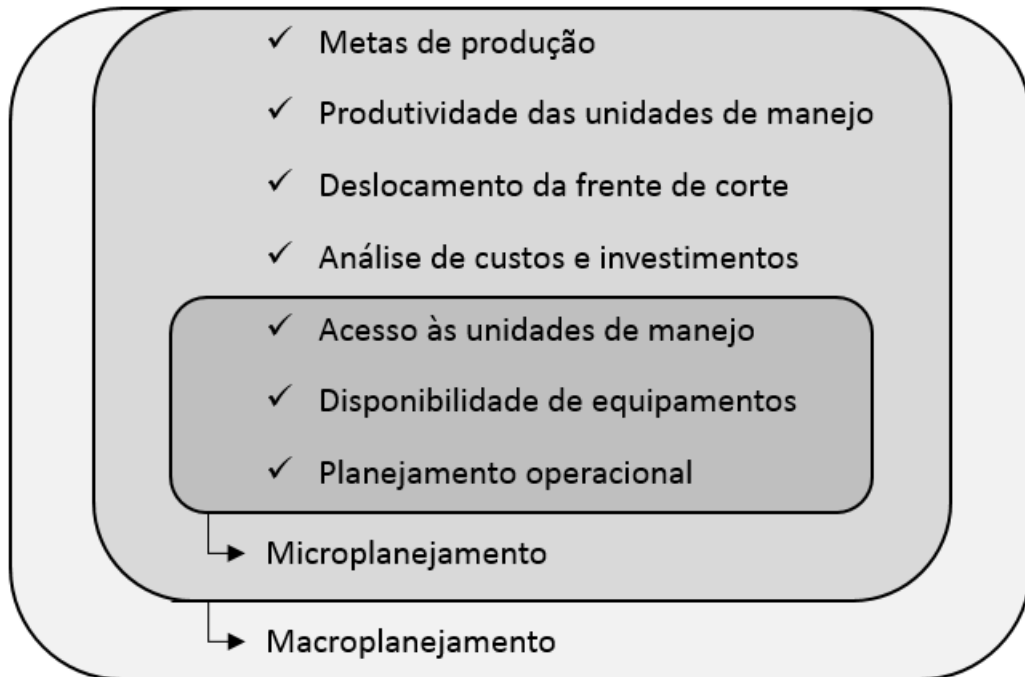
A relação espacial entre os talhões é um importante aspecto levado em conta no planejamento tático. Esta relação é expressa por meio de critérios ou restrições espaciais, que representam barreiras físicas de deslocamento da frente de colheita na floresta ou ambientais (MITCHEL, 2004; SESSIONS e BETTINGER, 2001).

O planejamento tático ainda pode ser dividido em macroplanejamento e microplanejamento. As responsabilidades do macroplanejamento consistem em levantar e caracterizar os talhões considerados aptos para serem colhidas nos períodos analisados, inferindo sobre a necessidade de investimentos e adequação da estrutura operacional existente. A aptidão dos talhões está relacionada aos aspectos produtivos florestais e à rede viária própria e externa envolvida nas operações de colheita.

Já no microplanejamento estratégico as análises são feitas no interior dos talhões, onde são definidas ações necessárias a serem efetuadas para possibilitar a colheita nos locais específicos. Sendo responsável por segregar e caracterizar todos

os aspectos operacionais que nortearão a estratégia de planejamento tático operacional de curto prazo (GUIMARÃES, 2004). Apresenta-se as responsabilidades do macro e microplanejamento tático florestal na Figura 1.

FIGURA 1 – RESPONSABILIDADES DO MACRO E MICROPLANEJAMENTO FLORESTAL



Sendo assim, o nível operacional de planejamento abrange horizontes de tempo curtos, em torno de um ano, com períodos que podem ser inferiores a uma semana, denominando as atividades a serem realizadas pelas equipes de trabalho competentes e máquinas existentes, incorporando as limitações oriundas das variações ambientais periódicas e gerenciando os sistemas de colheita, transporte e a entrega dos produtos específicos aos compradores (MITCHEL, 2004; BANHARA, 2009).

2.2 PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL

Embora a ordem espacial sempre tenha sido um fator considerado pelo planejamento florestal, os modelos matemáticos que incorporam fisicamente os critérios espaciais tem avançado rapidamente nos últimos 20 anos. Este avanço coincide com os avanços nos hardwares e softwares de computadores, tecnologias

de satélites e sistemas de informação geográfica (SIG) bem como as alterações nos valores da sociedade associados as condições das florestas (SCHAN et al., 2009).

Esta visão integrada da floresta ganhou atenção ao longo dos últimos anos resultando no conceito de planejamento florestal espacial, que corresponde à um processo de tomadas de decisão mais consistente sobre os aspectos envolvidos (GOMIDE, 2009). Levando-se em conta a distribuição espacial, o tamanho e o formato dos talhões contidos na floresta cria-se uma relação entre esses componentes que permite caracteriza-los. No planejamento florestal espacial esta relação é considerada por meio da formulação de restrições exclusivas, que não estão presentes no planejamento florestal tradicional (BASKENT e KELES, 2005).

Um dos problemas de planejamento florestal espacial mais amplamente estudados está relacionado aos limites de área de colheita em talhões adjacentes. Este problema é muitas vezes referido na literatura como problema de adjacência (MCDILL, 2014) presentes por exemplo, nos trabalhos de Carvajal et al. (2012), Constantino et al. (2008) e Gomide (2009).

Outros importantes problemas de planejamento florestal espacial estão no transporte principal da colheita florestal até as unidades consumidoras. Estes problemas são apresentados nos trabalhos de Arce (1997), Weintraub et al. (1996), Souza (2004) e Forsberg et al. (2005).

Uma questão importante do planejamento florestal espacial é a configuração ideal da rede de estradas de acesso aos talhões, de forma a minimizar os custos das operações na floresta. Kirby et al. (1986) denominaram de Modelos de Recursos Integrados (IRPM, em inglês, *The Integrated Resource Planning Models*) de manejo florestal, a classe de modelos matemáticos que se interessa simultaneamente pelo problema de colheita e configuração da rede de estradas florestais.

Na geração dos modelos IRPM, primeiramente analistas florestais dividem a floresta em polígonos, utilizando ferramentas como sistema de informação geográficas, de tal forma que cada polígono é um talhão ou um grupo de talhões adjacentes que serão colhidos no mesmo período do horizonte de planejamento. O objetivo é decidir em qual período e quais unidades de manejo serão cortadas, e onde serão construídas ou reformadas as estradas na floresta, de modo que a função seja otimizada como, por exemplo, o valor presente da madeira menos os custos com estradas e transporte madeireiro (GUIGNARD et al., 1998).

Kirby et al. (1986) foram pioneiros na implementação de um modelo IRPM de manejo florestal, com uso da programação linear inteira mista. Os autores relacionaram, por meio de restrições com variáveis binárias, os trechos de estradas envolvidos no acesso às respectivas áreas florestais. A utilização das variáveis binárias no processo de formulação dos modelos de programação linear possibilitou abordar as decisões de construção dos trechos de estradas. Segundo Weintraub e Murray (2006) a adição de características espaciais na formulação de modelos de programação linear só é permitida por meio do uso de variáveis binárias.

Guignard et al. (1998) descreveram uma abordagem científica pelo método exato eficiente para este problema, utilizando o algoritmo de resolução de modelos de programação linear inteira *Branch-and-Bound*, por meio da indicação das variáveis prioritárias nas soluções básicas obtidas nas ramificações, permitido em softwares como o GUROBI, LAMPS, OSL ou o CPLEX. Esta experiência com os modelos IRPM, mostrou que o tempo computacional pode ser reduzido surpreendentemente.

Nelson e Brodie (1990) estratificaram a floresta em grupos contínuos de talhões adjacentes denominados blocos de colheita, e formularam modelos de otimização da colheita florestal que minimiza os custos com a construção da rede de estradas envolvida, obtendo soluções via PLIM e *Simulação de Monte-Carlo*.

Andalaf et al. (2002) considerando horizontes de planejamento de 5 anos, formularam modelos de programação linear inteira mista, para otimização da colheita e da rede de estradas florestais envolvidas, com alternativas de solução envolvendo a relaxação lagrangeana e obtiveram boas soluções.

Nelson (2001) formulou modelos IRPM comparando a forma manual de criação de blocos de colheita (com uso da ferramenta SIG) e uma forma automatizada (por meio da geração de polígonos de cobertura), testando blocos de tamanhos variados; evidenciando a importância de novos estudos que incorporem rotinas mais abrangentes, com novos indicadores de paisagem incluídos na avaliação dos resultados. Segundo o mesmo autor, projetar digitalmente áreas contíguas de colheita em potenciais demanda tempo e esforços especializados, que relacionem a dimensão e distribuição espacial dessas áreas, a fim de resolver o problema de tomada de decisão.

2.3 AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL

O rendimento contínuo florestal tem sido praticado pelos manejadores nos últimos anos objetivando regular a produção e garantindo um fluxo constante de madeira produzido pela colheita. Por várias razões, a colheita de uma mesma quantidade de área por período pode ou não resultar em um fluxo equilibrado de madeira. De acordo com este cenário, os modelos de otimização permitem regular a produção madeireira da colheita por meio do sequenciamento de áreas ideais para o corte nos períodos analisados (MCDILL, 2014).

As previsões de produção madeireira podem ser fornecidas por meio dos rendimentos obtidos no passado e estimativas diretas de volumes por sortimento de madeira. Os sortimentos maiores são intercambiáveis pois é permitido alocar um determinado volume de sortimento na classe de tamanho inferior, garantindo flexibilidade nas estimativas de produção. Tipicamente, esta regra de conversão permite que o volume de toras de melhor qualidade seja rebaixado em produtos de menor qualidade, gerando novas previsões de rendimento (MITCHELL, 2004).

Alcançar as metas volumétricas de produção impostas para diferentes sortimentos é de responsabilidade do planejamento tático, segundo a classificação hierárquica atribuída por Andersson (2005). Nestes problemas lança-se mão dos métodos matemáticos exatos de otimização, tendo em vista a grande quantidade de variáveis envolvidas que torna o problema complexo de ser resolvido (DIAZ-BALTEIRO et. al., 2008).

Dentre as variáveis envolvidas nos problemas de planejamento da colheita estão os equipamentos disponíveis, locais a serem explorados, manutenção de estradas e as metas de produção a serem atingidas. Compreender e avaliar os sistemas de colheita empregados no problema em questão, independente do grau de mecanização, é fundamental para qualquer previsão do processo de produção que visa a racionalização e otimização dos recursos (LOPES et al., 2009).

O fator de decisão sobre a colheita nas unidades de manejo é a produtividade ou rendimento da colheita, que pode ser traduzido em custo por m³ produzido, sendo diretamente influenciado pelas variáveis do terreno (inclinação, tipo de solo etc.), do povoamento (espécie, volume médio individual, número de árvores por hectare e etc.) e outras variáveis do planejamento empresarial. As previsões de rendimento são imprescindíveis na geração de orçamentos e dos modelos de planejamento da

colheita. Além disso as questões relacionadas à logística da colheita também vêm sendo reconhecidas como um componente importante no processo de planejamento da colheita florestal, pois desde a implantação das florestas até a execução da colheita, o objetivo principal deve ser o escoamento da madeira produzida com o menor custo e a maior garantia de abastecimento possível (MALINOVSKI et al., 2010).

Depois dos custos de implantação e colheita, as estradas representam o maior investimento no empreendimento, atendendo de forma abrangente os aspectos envolvidos. Além das estradas apresentarem longo período de depreciação, são compostas por diferentes custos em função do padrão escolhido (MALINOVSKI, 2010).

Conceitualmente, rede viária florestal é um conjunto de estruturas ou formas fundamentais de caminhos lançados sobre uma área florestal com relação à união ou ligações entre si (BRAZ¹, 1997, *apud* MALINOVSKI, 2010). Segundo o mesmo autor, o planejamento da rede de estradas deve buscar a perfeita combinação entre distância ótima, densidade e classe de estrada, tal que os custos de transporte sobre os custos de construção, sejam sob condições específicas, os menores possíveis.

Existem vários softwares que automatizam a criação da rede de estradas na floresta. Dentre eles estão o *PEGGER & ROADVIEW*, *ReadEng. O.R.* e o *Lumberjack W.A.*, entretanto eles não possuem a capacidade de integrar os problemas de agendamento da colheita florestal. Para isso é preciso recorrer aos modelos de otimização formulados para resolver esses problemas em específico (AKAY et al., 2013).

2.4 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

2.4.1 Problemas de planejamento tático da colheita florestal

Os problemas de planejamento tático da colheita florestal que envolvem o agendamento da colheita junto a configuração da rede de estradas são problemas de natureza combinatória e exigem variáveis inteiras de decisão. Como consequência, a

¹ BRAZ, E. M. **Otimização da rede de estradas secundárias em projetos de manejo sustentável de floresta tropical**. Rio Branco, EMBRAPA, 1997, 36p. Circular Técnica.

formulação desses modelos é extensa quanto ao número de variáveis e restrições tornando-os difíceis de serem resolvidos (CHURCH et al., 1998).

Uma maneira de encontrar a melhor solução para qualquer problema de otimização combinatória pode ser a enumeração completa das soluções viáveis e análise das funções objetivos para determinar a solução com melhor resultado. No entanto, esta abordagem não é eficaz na prática, frente ao grande número de soluções alternativas (AKAY et al., 2013).

Dentre as técnicas de resolução destes problemas destacam as pertencentes à área da ciência denominada pesquisa operacional, a qual pode ser definida como uma abordagem científica para a resolução de problemas na gestão de sistemas complexos (ASSOCIATION OF EUROPEAN OPERATIONAL RESEARCH SOCIETIES, 2009).

As técnicas de otimização da pesquisa operacional são ferramentas úteis para encontrar a solução ideal ou próxima ao ideal em um prazo aceitável. A seguir são descritas as técnicas de otimização com algoritmos exatos (Programação Linear) e com algoritmos aproximativos (Heurísticas) utilizadas na resolução destes problemas florestais. A grande vantagem dos algoritmos exatos é que eles garantem a solução ótima para o problema que está sendo resolvido (AKAY et al., 2013).

2.4.2 Programação Linear

Algumas das primeiras aplicações da programação linear no planejamento florestal incluem os trabalhos de Curtis (1962) e Ware e Clutter (1971). Mais tarde Johnson e Scheurman (1977) dividiram os problemas de PL aplicados no planejamento da colheita e produção florestal em dois tipos básicos. Com o Modelo Tipo I, a atividade de cada variável está associada com as possíveis alternativas individuais de manejo no horizonte de tempo. Enquanto que no Modelo Tipo II, as variáveis se formam com os conjuntos das opções individuais de manejo. Isto significa que todas as unidades de manejo que serão colhidas em um mesmo período formam uma unidade de cálculo (KANGAS et al., 2008).

Uma grande diferença entre estes modelos é a quantidade de variáveis e restrições que os modelos apresentam, sendo que o Modelo Tipo II geralmente apresenta menos variáveis que o Modelo Tipo I. Outra característica é a integridade

das unidades de manejo que é respeitada somente no Modelo Tipo I (RODRIGUES et al., 2006).

Os modelos de PL podem governar a maioria das questões quantitativas, por meio de expressões lineares. Entretanto, alguns artifícios devem ser introduzidos nos modelos quando o problema engloba variáveis inteiras. Neste caso, o uso da programação linear com variáveis inteiras e/ou mistas se faz necessário (GOMIDE, 2009).

Em muitos destes casos parte das variáveis tem valores inteiros enquanto as restantes possuem valores contínuos. Estes problemas são chamados de problemas de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). As variáveis binárias são um caso especial de variáveis inteiras, onde se permite somente a variação de valores binários (0 e 1). Existem duas formas populares de resolver os problemas de PLIM, o algoritmo *branch-and-bound* e o *método de corte*, e ambos exploram o algoritmo SIMPLEX (KANGAS et al., 2008).

A maioria das aplicações dos modelos de PLIM nos problemas de planejamento florestal se refere às necessidades de se representar as unidades de manejo de forma íntegra, incorporando restrições espaciais e restrições operacionais (MITCHEL, 2004; WEINTRAUB e MURRAY, 2006; BANHARA, 2009).

Formulações de modelos de PLIM são úteis para resolver problemas de planejamento florestal. Geralmente problemas de programação com variáveis inteiras são difíceis de resolver gerando maior exigência computacional (BUONGIORNO e GILLESS, 2004). Neste ponto, segundo Andalaft et al. (2002) muitas vezes é necessário recorrer aos métodos heurísticos para obtenção de soluções aproximadas.

2.4.3 Métodos Heurísticos

No planejamento florestal são comuns os problemas categorizados como *NP-Hard*, ou seja, com uma ordem de complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para sua resolução cresce exponencialmente impossibilitando por meio de algoritmos exatos, obter a solução ótima. Em muitos destes casos, são utilizados algoritmos de aproximação denominados metaheurísticas para suprir as deficiências das técnicas tradicionais de resolução.

Metaheurísticas são técnicas de obtenção de resultados aproximados de maneira ágil; no entanto, precisam sofrer mudanças constantes relacionadas aos parâmetros dos algoritmos para garantir a adaptação aos problemas, onde uma simples combinação menos eficiente destes parâmetros leva a respostas divergentes, distantes do ótimo (GOMIDE, 2009).

Algumas metaheurísticas são amplamente difundidas na ciência, tendo sido aplicadas na resolução de problemas de transporte madeireiro e configuração de rotas específicas a partir de uma rede de estradas. Entre elas estão as metaheurísticas *Simulated Annealing*, utilizada por Akay et al. (2004); *Algoritmo Genético*, utilizado por Ichihara et al. (1996) e *Busca Tabu*, utilizado Aruga et al. (2004). Além de procedimentos heurísticos específicos, como o trabalho de Tan (1999) que utilizou uma heurística junto ao algoritmo de caminho mínimo de Dijkstra para inferir sobre a construção das estradas na floresta.

2.5 ALGORITMOS DE CAMINHOS MÍNIMOS

Na teoria dos grafos existem algoritmos sequenciais capazes de identificar os caminhos mínimos entre os pares de vértices existentes em um grafo conexo. Estes problemas denominados problemas do caminho mínimo estão entre os mais estudados da geografia computacional (LANTHIER et al., 2003). De um modo geral, o problema de caminho mínimo está em encontrar o caminho mais curto entre um par de nós contidos em um grafo conexo, de modo que a soma dos pesos dos arcos percorridos seja minimizada. Na prática, os arcos podem ser trechos de estradas e os pesos podem representar distâncias, custos ou tempos (AKAY et al., 2013).

Na área florestal, algoritmos de caminhos mínimos têm sido usados no desenvolvimento da rede de estradas ideal. Em problemas integrados de otimização da colheita, os modelos de PLIM são formulados contendo restrições de fluxo produzidas a partir dos algoritmos de caminhos mínimos (AKAY et al., 2013).

O algoritmo de Dijkstra é um dos mais eficientes para resolver o problema do menor caminho entre um par de nós de um grafo conexo, onde todos os pesos são positivos (DIJKSTRA, 1959). Anderson e Nelson (2004) desenvolveram um algoritmo de rápida geração de redes rodoviárias para o planejamento estratégico das estradas florestais. Nesse estudo, o algoritmo de Dijkstra foi usado na formulação de restrições

de *design* da rede de estradas minimizando as distâncias entre as operações de carregamento e destino da produção.

O algoritmo proposto por Robert Floyd e Stephen Warshall, conhecido como Floyd-Warshall e publicado em 1962, é um algoritmo de programação dinâmica que resolve o problema do menor caminho entre todos os pares de nós pertencentes à um grafo conexo, valorado e orientado. Seguindo a estrutura apresentada por Cormen et al. (1990) a sequência a seguir descreve a estrutura de um caminho mais curto:

- Considere um menor caminho $(i \rightarrow p \rightarrow j)$ com todos os vértices intermediários em $\{1, 2, \dots, k\}$.
- Se k não é um vértice intermediário de p , então, todos os vértices intermediários de p estão em $\{1, 2, \dots, k-1\}$, também é um caminho mais curto $i \rightarrow j$ com todos os vértices intermediários no conjunto $\{1, 2, \dots, k\}$.
- Se k é um vértice intermediário de caminho p , então desmembra-se o caminho p em $(i \rightarrow p_1 \rightarrow k \rightarrow p_2 \rightarrow j)$, p_1 é um caminho mais curto de i até k , com todos os vértices intermediários no conjunto $\{1, 2, \dots, k-1\}$. A mesma ideia se aplica a p_2 .

Uma formulação recursiva é definida por Cormen et al. (1990) como segue:

Seja $d_{ij}^{(k)}$ o peso de um menor caminho $i \rightarrow j$ com todos os vértices intermediários em $\{1, 2, \dots, k\}$. Quando $k=0$, um caminho desde o vértice i até o vértice j sem vértices intermediários com numeração mais alta que 0 não tem absolutamente nenhum vértice intermediário.

$$d_{ij}^{(k)} = \begin{cases} W_{ij} & \text{se } k = 0 \\ \min(d_{ij}^{(k-1)}, d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)}) & \text{se } k \geq 1 \end{cases}$$

Considerando-se que, para qualquer caminho, todos os vértices intermediários estão no conjunto $\{1, 2, \dots, n\}$, a matriz $(D^{(n)} = (d_{ij}^{(n)}))$ fornece a resposta desejada: $d_{ij}^{(n)} = \delta(i, j)$ para todo $i, j \in V$.

A seguir é apresentado o pseudocódigo do algoritmo de Floyd-Warshall para calcular os valores $d_{ij}^{(k)}$. Sua entrada é uma matriz $W = (w_{ij})$ onde:

$$\begin{cases} 0 & \text{se } i = j, \\ \text{o peso da aresta orientada } (i, j) & \text{se } i \neq j \text{ e } (i, j) \in E, \\ \infty & \text{se } i \neq j \text{ e } (i, j) \notin E. \end{cases}$$

Observa-se a seguir o pseudocódigo do algoritmo de Floyd-Warshall:

FLOYD-WARSHALL (W)

1 $n = W.\text{linhas}$

2 $D^{(0)} = W$

```

3  for k = 1 to n
4  for i = 1 to n
5    for j = 1 to n
6       $d_{ij}^{(k)} = \min(d_{ij}^{(k-1)}, d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)})$ 
7  return  $D^{(n)}$ 

```

Como saída, o procedimento retorna a matriz $D^{(n)}$ de mínimos caminhos.

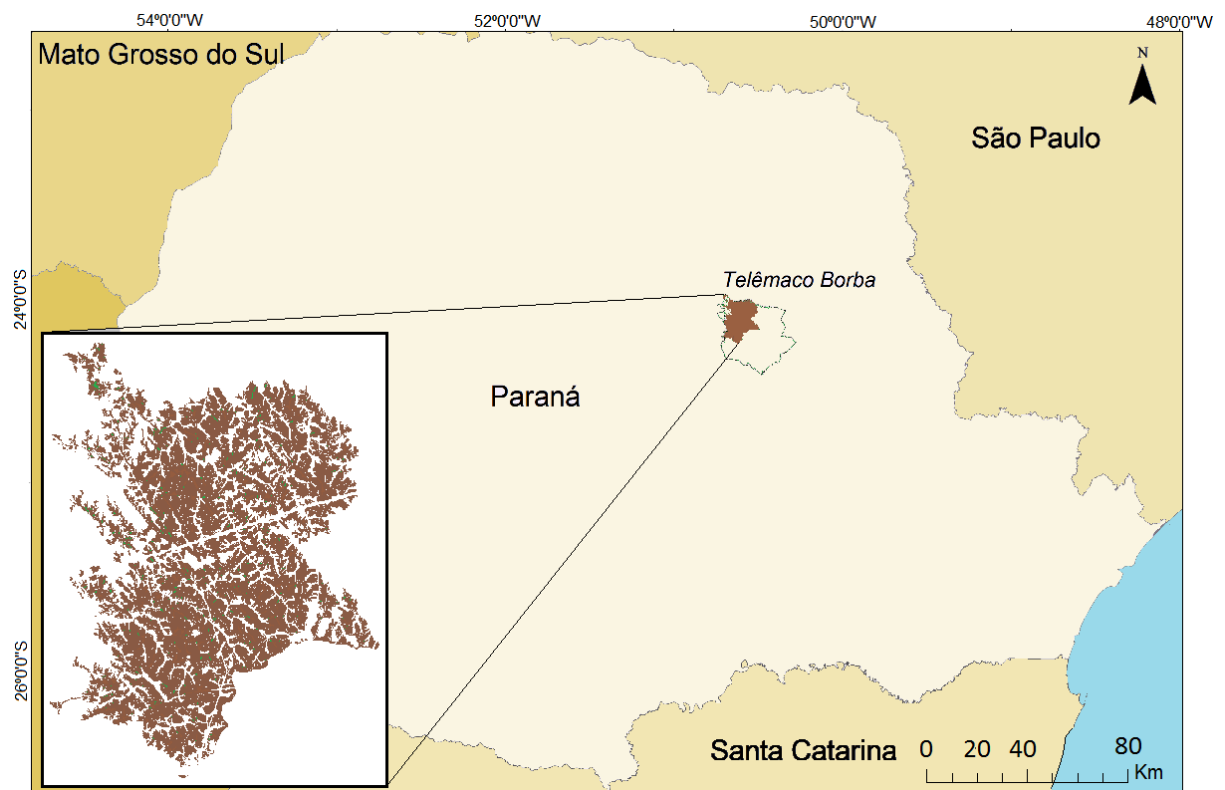
Existem muitos trabalhos onde o algoritmo de Floyd-Warshall foi implementado, como os trabalhos de Harish e Narayanan (2007), Carvalho (2003), Hougardy (2010) e Gaiosio et al. (2013). As utilizações do algoritmo de Floyd-Warshall são mais comuns quando se trata de grafos densos, como nas situações reais de rede de estradas. No entanto ele possui uma ampla variedade de aplicações em diversas áreas, tais como: bioinformática, roteamento de tráfego em redes ou qualquer problema que possa ser representado por um grafo no qual as arestas sejam ponderadas, e cujos valores sejam positivos e linearmente acumulados à medida que a rede é percorrida (GAIOSO et al., 2013; YOGARATNAM, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área objeto deste estudo é composta por 8 fazendas pertencentes à empresa Klabin S.A., todas localizadas no município de Telêmaco Borba, região dos Campos Gerais do estado do Paraná, aproximadamente entre as coordenadas 24° 03' e 24° 28' de latitude sul e 50° 21' e 50° 43' de longitude oeste (FIGURA 2).

FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



O relevo da região é suavemente ondulado e a altitude média da área de estudo é de 850 m acima do nível do mar. De acordo com a classificação de Köppen o clima da região pertence ao tipo Cfb, ou seja, temperado úmido, sem estação seca, com verão fresco e geadas periódicas. A temperatura média anual na região é de 18,6°C e a precipitação anual média é de 1.608 mm/ano segundo Nunes *et al.* (2010).

3.2 AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL

3.2.1 Caracterização do problema

Atualmente, o agendamento da colheita florestal vai além das preocupações de atingir as metas de produção madeireira. O aumento do rendimento produtivo e a diminuição do uso dos recursos não renováveis tem se tornado fatores preponderantes no processo de produção florestal (CHAN, 2009). Nas grandes empresas produtoras de florestas plantadas, muitas vezes os talhões estão distribuídos espacialmente de forma heterogênea quanto às idades e espécies, o que torna necessário dimensionar uma série de atividades de logística e procedimentos técnicos a serem incorporados no problema de agendamento da colheita florestal (GOMIDE, 2009).

De acordo com a estrutura de planejamento florestal hierárquico proposta por Andreson (2005) e Kangas et al. (2008) é de responsabilidade do planejamento tático estabelecer a agenda de corte nos talhões, alcançando o melhor rendimento possível, traduzido pelo custo mínimo de produção.

Assim, o problema foi caracterizado com a necessidade de gerar um plano tático de corte, de forma que a soma dos custos de colheita e de construção de estradas sejam minimizados, sem violar os níveis de produção estabelecidos pela empresa e para a área de estudo nos períodos analisados, analogamente aos problemas encontrados nos trabalhos de Andalaft et al. (2002) e Nelson (2001), que foram resolvidos por meio da formulação de modelos IRPM de manejo florestal, segundo classificação proposta por Kirby et al. (1986).

3.2.2 Estrutura inicial da floresta

A área total produtiva do estudo compreende 23.325 ha de reflorestamento de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. Nas Tabelas 1 e 2 apresenta-se a estrutura inicial dos plantios por classe de idade, considerando a frequência dos talhões de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp.

TABELA 1– ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA EM RELAÇÃO AO GÊNERO *Pinus*

Classes de idade (anos)	Área		Talhões	
	(ha)	(%)	Frequência	(%)
[0-6)*	1.506	13,8	112	13,8
[6-10)*	4.101	37,8	402	26,7
[10-12)*	1.277	11,7	198	13,1
[12-15)*	1.663	15,3	252	16
[15-20)	543	5,0	99	7,0
[20-25)	53	0,4	25	1,7
[25-30)	38	0,3	19	1,3
[30-35)	387	3,5	78	5,6
[35-40)	1.216	11,2	193	13,8
[40-45)	19	0,1	9	0,6
[45-50)	16	0,1	8	0,5
Total	10.819	100	1395	100

* Intervalos definidos em relação às idades mínimas de corte dos cenários simulados

TABELA 2 – ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA EM RELAÇÃO AO GÊNERO *Eucalyptus*

Classes de idade (anos)	Área		Talhões	
	(ha)	(%)	Frequência	(%)
[0-4)*	6.290	52,2	470	44,3
[4-5)*	2.980	24,3	125	11,7
[5-6)*	299	2,2	34	3,1
[6-10)*	2367	19,9	301	28,1
[10-15)	58	0,4	18	1,7
[15-20)	72	0,5	14	1,3
[20-25)	74	0,5	22	2,0
[25-30)	123	0,9	32	4,0
[30-35)	83	0,6	12	1,1
[35-40)	77	0,6	15	1,4
[40-45)	83	0,6	17	1,6
Total	12.506	100	1.060	100

* Intervalos definidos em relação às idades mínimas de corte dos cenários simulados

As projeções dos incrementos em volume dos talhões foram determinadas seguindo as curvas de produção fornecidas pela empresa em função do sítio, tipo de material genético, espécie e idade, considerando períodos anuais e oito tipos de sortimentos madeireiros.

Os sortimentos foram diferenciados por gênero (*Pinus* ou *Eucalyptus*) e classe (C1, C2, C3, C4) com base no diâmetro da ponta fina (DPF) com casca e 2,5 metros de comprimento, conforme apresentado na Tabela 3.

TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO DOS SORTIMENTOS

Classe	Diâmetro na ponta fina (cm)
C1	≥ 35
C2	[25 – 35)
C3	[18 – 25)
C4	≤ 18

3.2.3 Definição das metas de produção

Os resultados do planejamento florestal estratégico da empresa estabelecem as metas anuais de produção madeireira para cada sortimento. A partir das informações estratégicas, o planejamento tático é responsável por gerar planos anuais de colheita com base em quatro diferentes produtos de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., descritos na Tabela 4.

TABELA 4 – PRODUTOS CONSIDERADOS NO PLANEJAMENTO TÁTICO DA EMPRESA

Produto	Classes de Sortimento
<i>Pinus processo</i>	C3 e C4
<i>Pinus comércio</i>	C1 e C2
<i>Eucalipto processo</i>	C3 e C4
<i>Eucalipto comércio</i>	C1 e C2

Os planos táticos de colheita gerados na empresa consideram o horizonte de planejamento (HP) de 5 anos para atingir as metas de produção anuais. Com base nos resultados de um plano tático de colheita fornecido pela empresa, no qual os períodos corresponderam aos anos de 2014 a 2018, foram determinadas as metas de produção anuais para a área de estudo, em toneladas por produto.

Um fato importante é que área de estudo, correspondendo à cerca de 20% da área produtiva total da empresa, é apenas responsável pelo suprimento de parte das suas necessidades de produção madeireira. Além do fato de ocorrerem variações na influência da área de estudo, no suprimento madeireiro empresarial. Sendo assim, ocorrem flutuações na meta de produção anual do plano tático fornecido, resultando em quantidades variadas dos produtos demandados nos cinco períodos analisados.

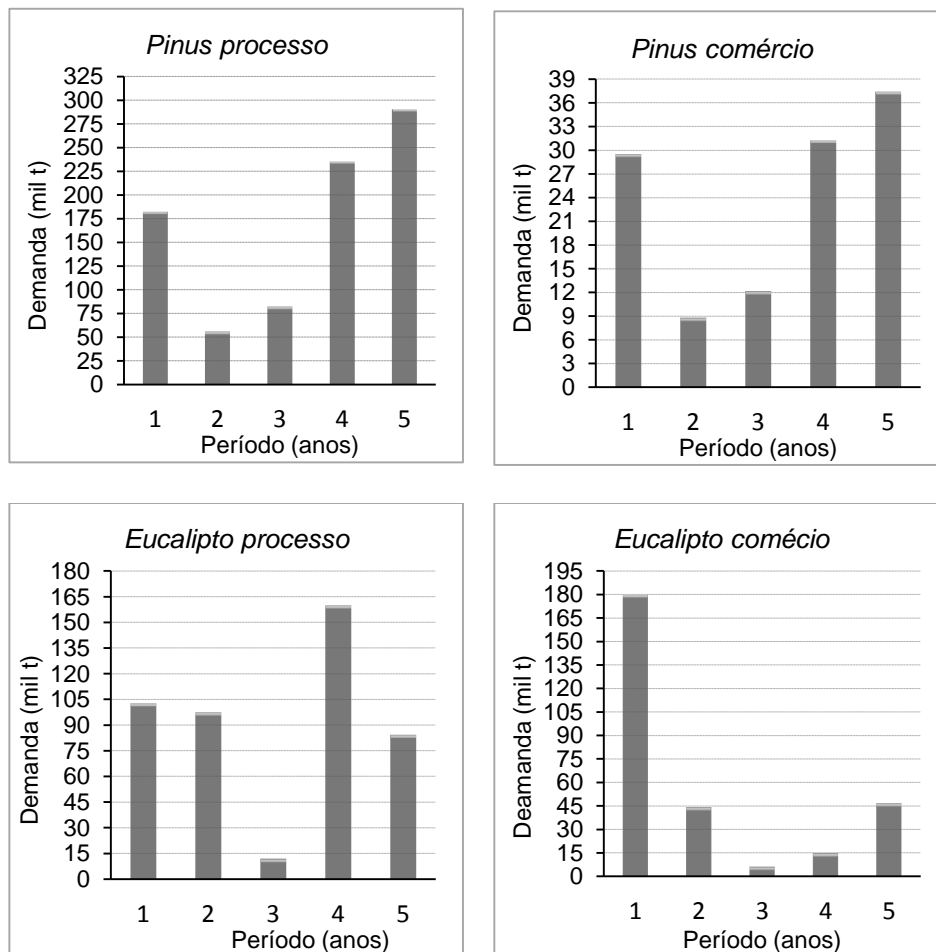
Na Tabela 5 estão as metas de produção, resultantes do plano tático fornecido para a área de estudo, para os cinco períodos anuais considerados e para os quatro diferentes produtos, em milhares de toneladas.

TABELA 5 – DEMANDA ANUAL DE PRODUÇÃO POR PERÍODO E PRODUTOS CONSIDERADOS, EM MILHARES DE TONELADAS

Produto	Ano (Período)				
	2014 (1)	2015 (2)	2016 (3)	2017 (4)	2018 (5)
<i>Pinus processo</i>	182	56	82	235	290
<i>Pinus comércio</i>	30	9	12	31	37
<i>Eucalipto processo</i>	103	33	12	160	84
<i>Eucalipto comércio</i>	180	44	6	15	47

Na Figura 3, observa-se as variações das metas de produção anual impostas por cada produto e para os cinco períodos analisados, correspondendo aos anos de 2014 a 2018.

FIGURA 3 – METAS DE PRODUÇÃO IMPOSTAS POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO E PRODUTO CONSIDERADO



3.2.4 Custos operacionais envolvidos

Foram fornecidos valores referentes aos custos operacionais das atividades de colheita, construção e manutenção de estradas florestais.

3.2.4.1 Colheita

Neste trabalho os custos das atividades de colheita correspondem ao rendimento da colheita nos talhões, traduzido pelo custo por tonelada de madeira produzida. A composição dos custos de colheita inclui as etapas de derrubada, processamento, arraste e carregamento.

Os custos de colheita por talhão seguiram as curvas de custos/produção fornecidas pela empresa, em função do número de árvores por hectare (N), volume médio individual (v_{mi}) e distância de arraste, variando entre 8 e 16 [R\$/t].

3.2.4.2 Manutenção de estradas

Os custos operacionais das atividades de manutenção, que inclui a construção e reforma de estradas, foram definidos após a obtenção da rede de estradas contida na área de estudo em formato vetorial, onde já estavam classificados os trechos existentes da rede de estrada. Foram identificados os trechos rodoviários pavimentados e duas classes de estradas não pavimentadas denominadas de principais e ramais, descritas a seguir.

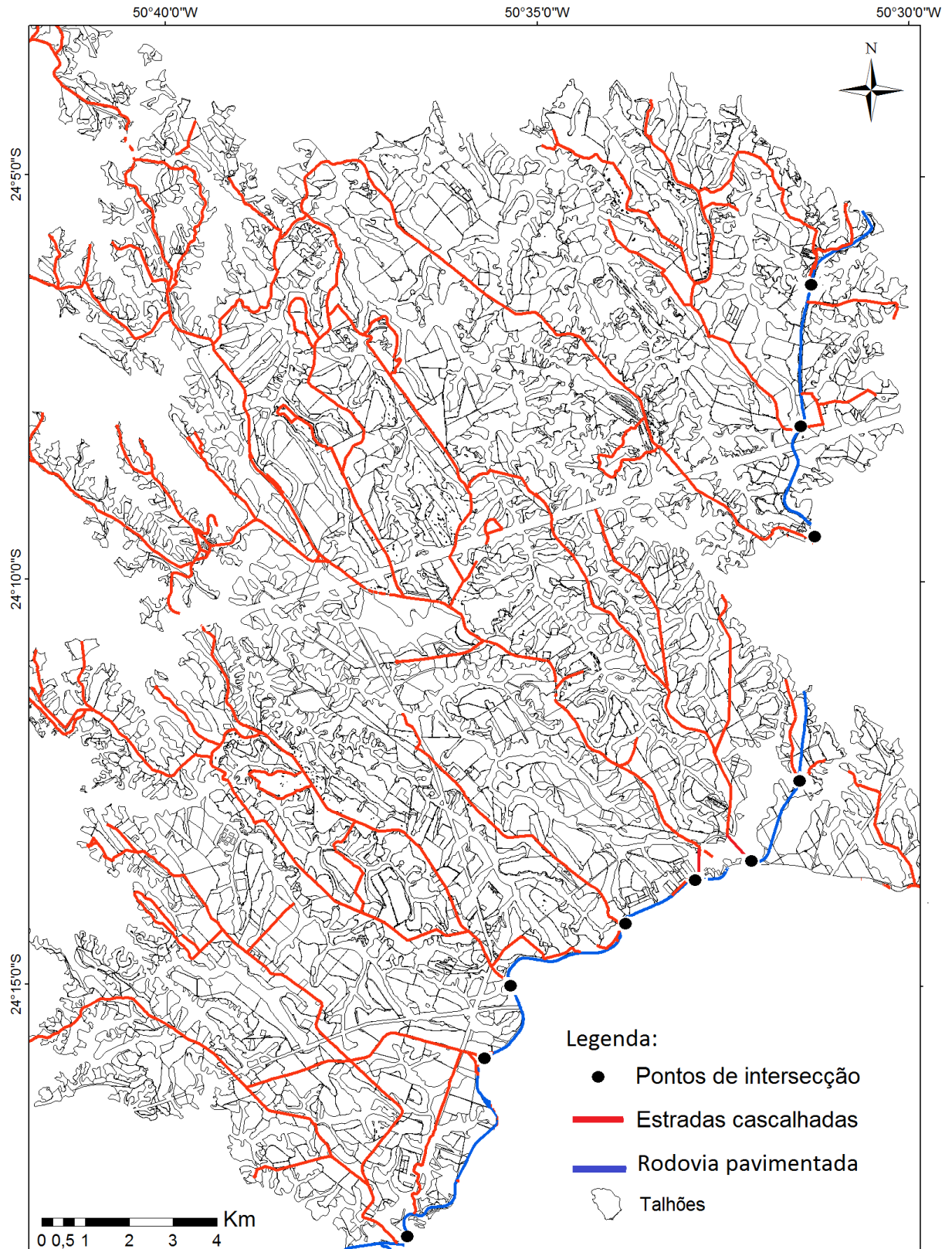
As estradas principais são trechos com revestimento primário, que proporcionam o tráfego em duas vias durante todo o ano.

Os ramais são trechos de estradas de leito natural, construídos no momento da colheita dos talhões de modo a permitir o acesso a partir das estradas principais.

O processo de obtenção dos trechos de ramais a serem construídos no momento da colheita dos talhões foi por meio dos softwares de informação geográfica do *ArcGIS*, onde a ferramenta de geoprocessamento denominada *Point Distance* permitiu obter os valores da distância euclidiana entre os talhões e os trechos da rede de estradas principal mais próximos, tomando por medida o ramal a ser construído em cada talhão.

Na Figura 4, pode ser visualizada a rede de estradas contida na área de estudo, identificando-se as estradas principais e a rodovia pavimentada, além dos pontos de intersecção das estradas principais e rodovia pavimentada.

FIGURA 4 – REDE DE ESTRADAS PRINCIPAL, RODOVIA PAVIMENTADA, PONTOS DE INTERSECÇÃO E TALHÕES CONTIDOS NA ÁREA DE ESTUDO



Foram estabelecidos custos fixos por quilômetro de estrada principal reformada e de ramal construído, com base no histórico da área de estudo. Para a reforma dos trechos de estradas principais o custo considerado foi de 15.000 [R\$/km]; já para construção dos ramais o custo considerado foi de 5.000 [R\$/km]. Neste trabalho não foram incluídas as possibilidades de serem construídos novos trechos de estradas principais.

3.3 MÉTODO DE GERAÇÃO DE CAMINHOS DE ESCOAMENTO DA PRODUÇÃO

A configuração da rede de estradas utilizada na colheita florestal é resultado do arranjo espacial dos talhões agendados para o corte, em um mesmo período de planejamento. Os ramais são construídos no momento da colheita de cada talhão de forma independente. Já as estradas principais são responsáveis por permitir o escoamento da produção madeireira a partir dos ramais dos talhões, até os pontos de intersecção com a rodovia pavimentada.

Portanto, ao contrário dos ramais quando se trata da rede de estradas principal é inviável atribuir à cada talhão os custos fixos de reforma para escoar a produção madeireira até os pontos de intersecção com a rodovia pavimentada. Isso ocorre devido ao fato de que um segmento de estrada principal pode acessar muitos talhões, resultando em muitas possibilidades combinatórias entre estes dois componentes, tornando necessário integrar no problema de planejamento da colheita florestal as relações entre os trechos da estrada principal existente e os talhões disponíveis para o corte.

Primeiramente, foram identificados todos os trajetos existentes na rede de estradas principais que unem os ramais dos talhões aos pontos de intersecção com a rodovia, por meio da construção de grafos contendo arcos representando cada segmento de estrada principal e rodovia, valorados com os respectivos comprimentos no terreno, e pontos representando os ramais dos talhões e os locais de intersecção com a rodovia pavimentada.

Por meio da ferramenta *Visual Basic® for Applications (VBA)*, disponível no *Microsoft® Excel® 2013*, foi implementado o algoritmo de caminho mínimo Floyd-Warshall, seguindo a estrutura apresentada por Cormen et al. (1990).

Após a etapa de implementação computacional, os grafos construídos serviram de entrada para o algoritmo Floyd-Warshall, que apresentou como saída a matriz de

mínimos caminhos, onde foi possível obter a sequência de arcos ou o caminho mais curto entre todos os pares de pontos contidos no grafo de entrada. Os caminhos simbolizam os menores trechos à serem percorridos/reformados na rede de estrada principal, quando as origens são os ramais dos talhões e os destinos são os pontos de intercessão com a rodovia pavimentada.

3.4 BLOCOS DE COLHEITA

A combinação dos atributos dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) sobre a composição da área de estudo, permitiu desenvolver um processo criterioso de obtenção de polígonos formados por conjuntos de talhões adjacentes com características de interesse. Devido ao fato de que estas características representam as necessidades operacionais impostas pela colheita, os polígonos operacionais formados foram denominados blocos de colheita.

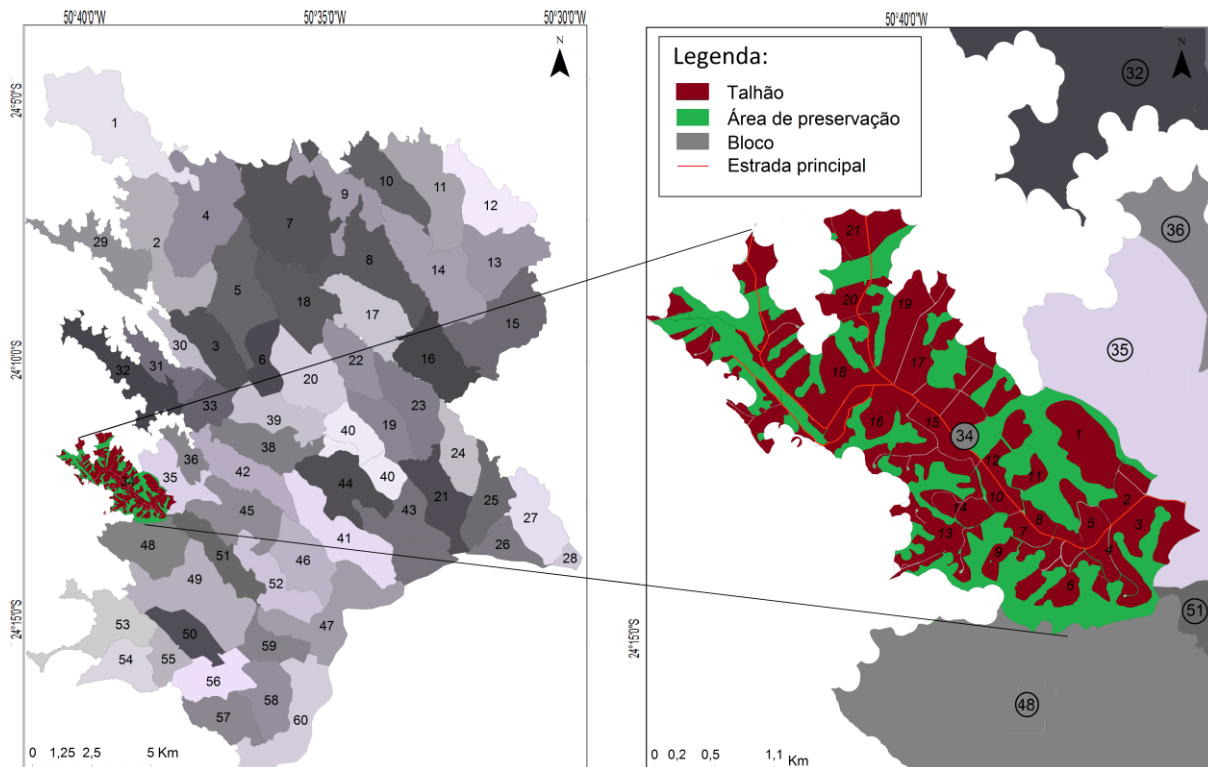
A configuração dos blocos de colheita é efetuada seguindo uma série de restrições impostas quanto aos limites de quantidade de área produtiva e qualidade de acesso dos blocos formados, tornando imprescindível entender a interação entre a colheita e os componentes físicos da floresta.

A área de estudo é composta por estradas principais, rodovias, áreas de preservação e talhões. Os blocos de colheita foram definidos com uso do software de SIG *ArcGis*, respeitando o seguinte conjunto de restrições impostas:

- Adjacência entre os talhões contidos em um mesmo bloco;
- Área produtiva mínima e máxima de 300 e 1.000 hectares, respectivamente;
- Todos os blocos devem possuir acesso por estrada principal.

Na Figura 5 apresenta-se uma fração do mapa da área de estudo, no qual um exemplo de formação de um bloco de colheita é exposto para elucidar o entendimento. Neste exemplo, as restrições impostas quanto a adjacência dos talhões, limites de área produtiva e estradas de acesso principal foram respeitadas.

FIGURA 5 – MAPA DA CONSTITUIÇÃO DE UM BLOCO DE COLHEITA PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO

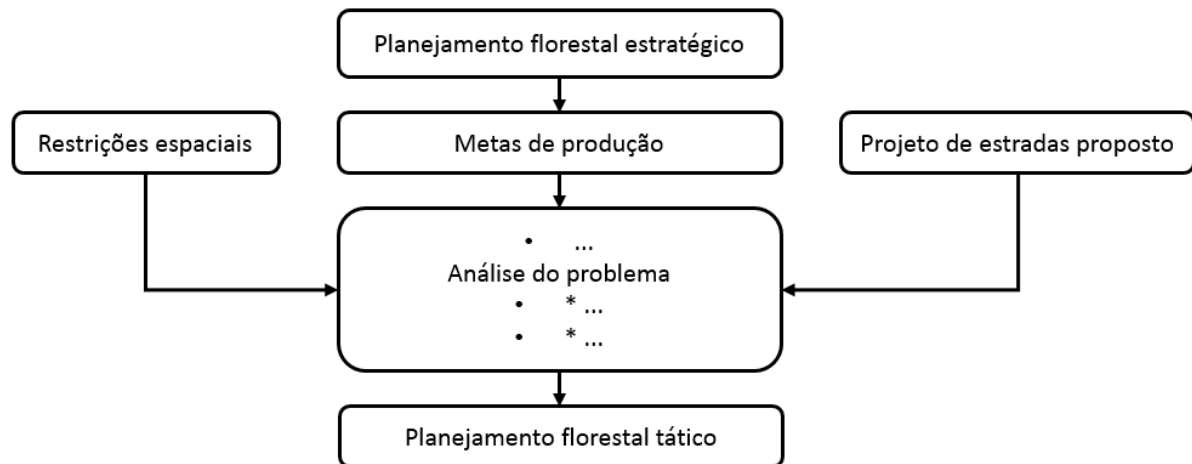


3.5 MODELOS PROPOSTOS

A abordagem dos modelos propostos se refere à minimização dos custos envolvidos na colheita e manutenção da rede de estradas florestais, atendendo os níveis de produção obtidos pelo plano tático fornecido pela empresa.

Muitos trabalhos da literatura objetivam maximizar o valor presente líquido de fluxos periódicos de produção madeireira. Neste trabalho, os níveis de colheita já foram definidos pelo planejamento estratégico, sendo assim as quantidades atingíveis de produção já vêm determinadas e por isso foi adotada uma abordagem diferente, tendo por objetivo a minimização dos custos envolvidos na colheita e rede de estradas florestais, atendendo os níveis de produção resultantes dos modelos de planejamento estratégico. O enquadramento dos modelos propostos é mostrado na Figura 6.

FIGURA 6 – QUADRO DOS MODELOS PROPOSTOS



FONTE: Modificado de GUNN E RICHARDS (1997).

Inicialmente foram propostos dois modelos de programação linear inteira mista (PLIM) seguindo a formulação do modelo tipo I de Johnson e Scheurman (1977) para sequenciamento anual das operações de colheita, denominados aqui de modelo *Talhão* e modelo *Bloco*.

Ambos os modelos foram formulados para minimizar os custos operacionais. Mais especificamente o objetivo foi minimizar o valor presente dos custos de colheita dos talhões e de reforma da rede de estradas florestal, considerando a taxa de juros fixa de 7% ao ano. A diferença entre o modelo *Talhão* e o modelo *Bloco* está na definição das variáveis de decisão. No modelo *Talhão* as variáveis são os talhões a serem colhidos nos períodos do horizonte de planejamento, enquanto no modelo *Bloco* as variáveis de decisão são conjuntos de talhões adjacentes ou “blocos de colheita” a serem colhidos nos períodos do HP. Posteriormente foi formulado um terceiro modelo denominado modelo *Misto*, por possuir ao mesmo tempo as variáveis de decisão de ambos os modelos anteriores.

A opção de minimizar o valor presente dos custos operacionais da atividade de colheita foi baseada na *Teoria dos Rendimentos* (COASE, 1937) seguindo a definição de que em um cenário empresarial a minimização dos custos é equivalente à maximização do lucro.

3.5.1 Formulação Matemática

As formulações matemáticas do modelo *Talhão*, modelo *Bloco* e modelo *Misto* são descritas a seguir. Primeiro são descritos os conjuntos de parâmetros e variáveis, e depois as funções objetivo e os conjuntos de restrições.

Parâmetros e variáveis:

U : número total de talhões;

B : número total de blocos de colheita;

T : número total de períodos de planejamento, em anos;

A : número total de trechos de estrada;

G : número total de grafos;

S : número total de produtos considerados no planejamento tático;

Y_{injk} : variável binária de decisão da colheita do talhão i , bloco n , no período j e contida no grafo k ;

X_{njk} : variável binária de decisão da colheita do bloco n , período j e contido no grafo k ;

Z_{tjk} : variável binária de decisão da reforma do trecho de estrada t , no período j e contido no grafo k ;

c_{injk} : valor presente do custo de colheita e construção do ramal do talhão i , bloco n , no período j e contida no grafo k , em R\$;

C_{njk} : valor presente do custo de colheita e construção dos ramais do bloco n , período j e contido no grafo k , em R\$;

R_{tjk} : valor presente do custo de reforma do trecho de estrada t , no período j e contido no grafo k , em R\$;

I_{tjk} : conjunto dos trechos de estrada que formam o caminho t , no período j e contidos no grafo k ;

W_{njk} : conjunto de talhões que formam o bloco n , no período j e contidos no grafo k ;

v_{pij} : volume do produto p , no talhão i e período j ;

V_{pnj} : volume do produto p , no bloco n e período j ;

$Lp_{Inferior}$: limite mínimo de produção volumétrica segundo a meta anual de cada produto;

$Lp_{Superior}$: limite máximo de produção volumétrica segundo a meta anual de cada produto;

F_j : número de blocos formados no período j .

- **Modelo Talhão**

Função objetivo:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^U \sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G c_{injk} Y_{injk} + \sum_{t=1}^A \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G R_{tjk} Z_{tjk} \quad (1)$$

Para cada talhão, pode existir mais de um caminho de acesso à rodovia pavimentada devido à existência de vários pontos de intersecção. Portanto os talhões podem estar contidos em mais de um grafo, sendo representados por mais de uma variável de decisão em cada período de planejamento. Para representar a integridade dos talhões e o sequenciamento das variáveis de decisão durante o HP, foi formulado o conjunto de restrições (2):

$$\sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G Y_{injk} \leq 1 \quad i = 1, \dots, U \quad n = 1, \dots, B \quad (2)$$

O segundo conjunto de restrições formulado permitiu integrar a rede de estradas principais no problema de planejamento da colheita. As restrições envolvem a reforma dos trechos de estradas principais contidos nos menores caminhos formados a partir dos talhões até os locais de acesso às rodovias pavimentadas, obtidos pela matriz de mínimos caminhos resultante do algoritmo Floyd-Warshall. O conjunto de restrições (3) é apresentado a seguir:

$$Y_{injk} \leq Z_{tjk} \quad n = 1, \dots, B \quad j = 1, \dots, T \quad k = 1, \dots, G \quad e \quad i \in I_{tjk} \quad (3)$$

Por último, os conjuntos de restrições (4) e (5) foram formulados para balizar as metas de produção impostas pelo planejamento estratégico, para cada produto e período de análise, dentro dos desvios considerados.

$$\sum_{i=1}^U \sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{K=1}^G v_{pij} Y_{injk} \geq Lp_{Inferior} \quad p = 1, \dots, S \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^U \sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{K=1}^G v_{pij} Y_{injk} \leq Lp_{Superior} \quad p = 1, \dots, S \quad (5)$$

- **Modelo Bloco**

Função objetivo:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G C_{njk} X_{njk} + \sum_{t=1}^A \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G R_{tjk} Z_{tjk} \quad (6)$$

Restrições de integridade das áreas e sequenciamento das variáveis de decisão, conjunto (7):

$$\sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G X_{njk} \leq 1 \quad n = 1, \dots, B \quad (7)$$

Restrições de reforma de caminhos, conjunto (8):

$$X_{njk} \leq Z_{tjk} \quad n = 1, \dots, B \quad j = 1, \dots, T \quad k = 1, \dots, G \quad e \quad n \in I_{tjk} \quad (8)$$

Restrições dos limites de produção impostos, conjunto (9):

$$\sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G V_{pnj} X_{njk} \geq L_{Inferior} \quad p = 1, \dots, S \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G V_{pnj} X_{njk} \leq L_{Superior} \quad p = 1, \dots, S \quad (10)$$

- **Modelo Misto**

Função objetivo:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G C_{njk} X_{njk} + \sum_{i=1}^U \sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G c_{injk} Y_{injk} + \sum_{t=1}^A \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G R_{tjk} Z_{tjk} \quad (11)$$

No momento em que um bloco é selecionado para colheita, o conjunto de talhões correspondente torna-se indisponível para a atividade, a situação também ocorre inversamente. Esta relação de integridade entre talhões e blocos é representada pelo conjunto (12) de restrições:

$$X_{njk} + Y_{injk} \leq 1 \quad i \in W_{njk} \quad n = 1, \dots, B \quad j = 1, \dots, T \quad e \quad k = 1, \dots, G \quad (12)$$

Restrições dos limites de produção impostos, conjuntos (13) e (14):

$$\sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G V_{pnj} X_{njk} + \sum_{i=1}^U \sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{K=1}^G v_{pij} Y_{injk} \geq L_{pInferior} \quad p = 1 \dots, S \quad (13)$$

$$\sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^G V_{pnj} X_{njk} + \sum_{i=1}^U \sum_{n=1}^B \sum_{j=1}^T \sum_{K=1}^G v_{pij} Y_{injk} \leq L_{pSuperior} \quad p = 1 \dots, S \quad (14)$$

No modelo *Misto* é necessário especificar um número mínimo de blocos a serem colhidos em cada período de planejamento. Devido as flutuações da demanda este número varia, portanto, testes preliminares estabeleceram as quantidades médias de blocos colhidos para atingir 70% da meta de produção em cada período de planejamento. Os outros 30% ficam disponíveis para serem preenchidos com a colheita das áreas mais convenientes, sejam elas representadas por blocos ou talhões. As especificações dos números de blocos são representadas pelo seguinte conjunto de restrições (15):

$$\sum_{n=1}^B \sum_{k=1}^G X_{ijk} \geq F_j \quad j = 1, \dots, T \quad (15)$$

Além das restrições descritas acima o modelo *Misto* também possui as restrições dos conjuntos (2), (3), (7), (8).

Adicionalmente, o software GUROBI OPTIMIZER 6.0.4. foi utilizado para resolver os modelos.

3.6 CENÁRIOS PROPOSTOS

De acordo com os planos táticos implementados na empresa, foi adotado um horizonte de planejamento de 5 anos com periodicidade anual. A demanda anual de madeira sofreu variações em sua meta a fim de possibilitar a geração de soluções factíveis nos modelos de PLIM. Testes preliminares estabeleceram porcentagens de desvios conservadoras de 5% ou 10% da meta de produção em cada período analisado, a depender do modelo utilizado.

Também foram determinadas três variações de idades mínimas de corte para *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. A primeira variação, denominada *Precoce*, corresponde as idades mínimas de 4 e 6 anos para *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., respectivamente, já a segunda variação, denominada *Semiprecoce*, corresponde as idades mínimas de 5 e 10 anos e a terceira variação, denominada *Normal*, corresponde as idades mínimas de 6 e 12 anos. O conceito de idade mínima de corte é comumente utilizado

na geração dos cenários de otimização de planejamento florestal, tendo em vista os trabalhos de Nelson (2001) e Binoti (2014).

Na Tabela 6 estão descritos os cenários de otimização de acordo com o modelo selecionado, variações de idades mínimas de corte e desvios da meta de produção.

TABELA 6 – ESTRUTURA DOS 9 CENÁRIOS DE OTIMIZAÇÃO FLORESTAL SIMULADOS NO ESTUDO

Cenário	Modelo	Variações das idades mínimas de corte	Idade mínima de corte de Eucalipto (anos)	Idade mínima de corte de Pinus (anos)	Desvios em relação à meta de produção (%)
1	<i>Talhão</i>	<i>Precoce</i>	4	6	±5
2	<i>Talhão</i>	<i>Semiprecoce</i>	5	10	±5
3	<i>Talhão</i>	<i>Normal</i>	6	12	±5
4	<i>Misto</i>	<i>Precoce</i>	4	6	±5
5	<i>Misto</i>	<i>Semiprecoce</i>	5	10	±5
6	<i>Misto</i>	<i>Todas</i>	4, 5 e 6	6, 10 e 12	±5
7	<i>Bloco</i>	<i>Precoce</i>	4	6	±10
8	<i>Bloco</i>	<i>Semiprecoce</i>	5	10	±10
9	<i>Bloco</i>	<i>Todas</i>	4, 5 e 6	6, 10 e 12	±5

Nos modelos *Bloco* e *Misto* não foram simulados cenários com somente a variação *Normal* de idades mínimas de corte, devido ao fato de que a obtenção de soluções factíveis nestes casos só foi possível por meio de desvios muito altos em relação à meta de produção por período, impossibilitando na prática a obtenção de bons resultados. Devido às características do conjunto de variáveis de decisão que simbolizam conjuntos de talhões adjacentes (blocos de colheita) nos modelos, é possível incorporar as produções resultantes das três variações de idades mínimas de corte de um mesmo bloco de colheita e período de planejamento. O resultado é um modelo que opta por agendar o melhor bloco de colheita e a melhor variação de idade mínima de corte em cada período de planejamento, abrangendo mais possibilidades de obtenção de resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Os problemas de otimização combinatória abordados neste estudo são considerados complexos de serem resolvidos com uso da PLIM. Tal complexidade resultou na formulação de modelos com centenas e até milhares de variáveis inteiras e restrições, impossibilitando em quase todos os modelos formulados obter as soluções inteiras ótimas por meio do algoritmo de programação inteira *Branch-and-Bound*. Diante disso, estabeleceu-se um tempo limite para o processamento de 3 horas (10.800 segundos) permitindo obter valores de soluções muito próximos do melhor *bound* existente, que podem inclusive ser soluções ótimas. Adicionalmente, após o tempo de processamento estabelecido de 3 horas não ocorrem melhoras consideráveis nas soluções obtidas. Na Tabela 7 apresenta-se o tamanho dos modelos de PLIM que compuseram os cenários simulados, o valor da função objetivo e a distância alcançada em relação ao melhor *bound*, possível de ser obtido.

TABELA 7 – RESUMO DAS DIMENSÕES E DOS RESULTADOS DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Cenário	Nome	Nº de variáveis inteiras	Nº de restrições	Valor da Função Objetivo	Distância do melhor bound (%)
1	<i>Talhão Precoce</i>	11.625	48.620	15.183.428	0,03
2	<i>Talhão Semiprecoce</i>	9.440	38.283	15.269.524	0,05
3	<i>Talhão Normal</i>	7.563	30.003	15.267.090	0,04
4	<i>Misto Precoce</i>	12.099	72.147	15.555.549	0,14
5	<i>Misto Semiprecoce</i>	11.634	60.514	15.412.358	0,05
6	<i>Misto Todas</i>	13.109	138.061	15.533.517	0,07
7	<i>Bloco Precoce</i>	691	1.644	15.844.598	0,00*
8	<i>Bloco Semiprecoce</i>	674	1.590	14.794.300	1,36
9	<i>Bloco Todas</i>	1.265	1.926	15.876.463	1,81

* melhor bound obtido

Nos cenários que utilizaram o modelo *Talhão* (Cenário 1, 2 e 3) observa-se as alterações nos números de variáveis inteiras e restrições. Este fato ocorre devido às variações nas idades mínimas de corte, pois a diminuição das mesmas provoca o aumento do número de talhões disponíveis para a colheita refletindo no maior número de variáveis inteiras e restrições dos modelos. O Cenário 1, que possui as menores

idades mínimas de corte, apresentou o maior número de variáveis inteiras e restrições, comparado aos cenários 2 e 3.

Tratando-se dos cenários que utilizaram o modelo *Misto* (Cenário 4, 5 e 6) é possível observar que o Cenário 6 apresentou o maior número de variáveis inteiras e restrições por abranger todas as variações de idades de corte dos blocos de colheita. O Cenário 4 que possui somente a variação *Precoce* de idades mínimas de corte apresentou mais variáveis inteiras e restrições que o Cenário 5 que possui a variação *Semiprecoce* de idades mínimas de corte, isso ocorre também devido ao maior número de talhões disponíveis para a colheita.

Nos cenários que utilizaram o modelo *Bloco* (Cenário 7, 8 e 9) é possível observar que o Cenário 9 apresentou o maior número de variáveis inteiras e restrições por abranger todas as variações de idades de corte dos blocos de colheita. O Cenário 7 foi o único que propiciou a solução ótima dentro do tempo de processamento. Os cenários 8 e 9 apresentaram as soluções mais distantes do *bound*, possivelmente devido às variáveis inteiras de decisão que simbolizam os blocos de colheita, conferindo menor flexibilidade em atingir soluções dentro de curtos intervalos.

Comparando os cenários segundo os modelos formulados (modelo *Talhão*, *Bloco* e *Misto*) nota-se que os cenários que utilizaram o modelo *Misto* possuem as maiores quantidades de variáveis inteiras e restrições devido ao aumento das possibilidades de corte das unidades de manejo, advindo pela inclusão simultânea das variáveis inteiras de decisão que simbolizam os talhões e os blocos de colheita nos modelos formulados.

4.2 ANÁLISE DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO

As comparações entre os cenários simulados e o cenário testemunha, que representa os resultados do plano tático fornecido pela empresa, foram feitas por meio de parâmetros de desempenho. A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio dos cenários simulados (Cenário 1 ao 9) e do cenário testemunha (Cenário 10), segundo os indicadores:

1. Rendimento dos talhões agendados para colheita
 - 1.1 Área de colheita e produção;
 - 1.2 Idade média e Incremento médio anual (IMA);
2. Manutenção da rede de estradas utilizadas

- 2.1 Extensão da rede de estradas principais reformadas;
- 2.2 Extensão da soma dos ramais de acesso construídos;
- 3. Custo de produção
 - 3.1 Custo total;
 - 3.2 Custo unitário de produção.

4.2.1 Rendimento dos talhões agendados para colheita

4.2.1.1 Área de colheita e produção

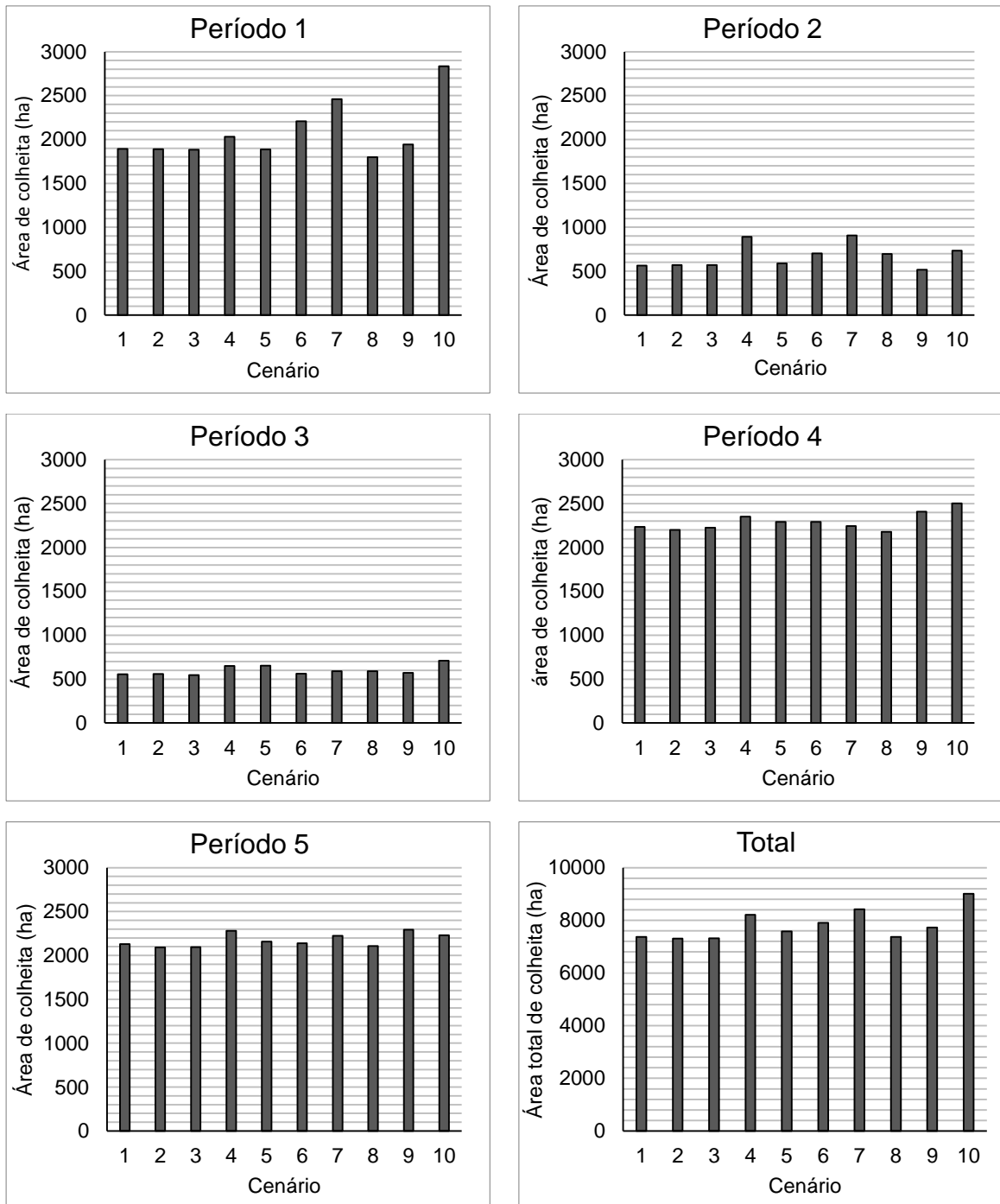
A Tabela 8 apresenta a área de colheita de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. dos cenários simulados e do cenário testemunha, para cada período de planejamento e a área total de colheita.

TABELA 8 – ÁREA DE COLHEITA DE *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO E TOTAL, PARA CADA CENÁRIO, EM HECTARES

Cenário	Nome	Espécies	Período					Total Geral
			1	2	3	4	5	
1	<i>Talhão Precoce</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	971	321	482	1.371	1.602	7.374
		<i>Pinus</i> spp	921	242	74	865	527	
2	<i>Talhão Semiprecoce</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	973	308	484	1.330	1.597	7.321
		<i>Pinus</i> spp	916	263	74	882	494	
3	<i>Talhão Normal</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	969	304	475	1.359	1.602	7.310
		<i>Pinus</i> spp	915	266	71	857	492	
4	<i>Misto Precoce</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	1.005	547	548	1.447	1.685	8.206
		<i>Pinus</i> spp	1.025	345	103	904	596	
5	<i>Misto Semiprecoce</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	965	322	576	1.381	1.595	7.576
		<i>Pinus</i> spp	921	268	78	909	562	
6	<i>Misto Todas</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	1.169	352	492	1.394	1.581	7.901
		<i>Pinus</i> spp	1.040	349	69	898	557	
7	<i>Bloco Precoce</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	1.203	554	501	1.392	1.629	8.424
		<i>Pinus</i> spp	1.257	352	89	852	595	
8	<i>Bloco Semiprecoce</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	915	391	490	1.345	1.613	7.371
		<i>Pinus</i> spp	884	303	100	834	496	
9	<i>Bloco Todas</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	1.071	256	486	1.471	1.707	7.733
		<i>Pinus</i> spp	873	259	86	938	585	
10	<i>Testemunha</i>	<i>Eucalyptus</i> spp	1.128	464	632	1.603	1.707	9.011
		<i>Pinus</i> spp	1.708	268	80	899	523	

Na Figura 7 é possível observar as variações das áreas de colheita por período de planejamento e cenários avaliados, como também as respectivas áreas totais de colheita.

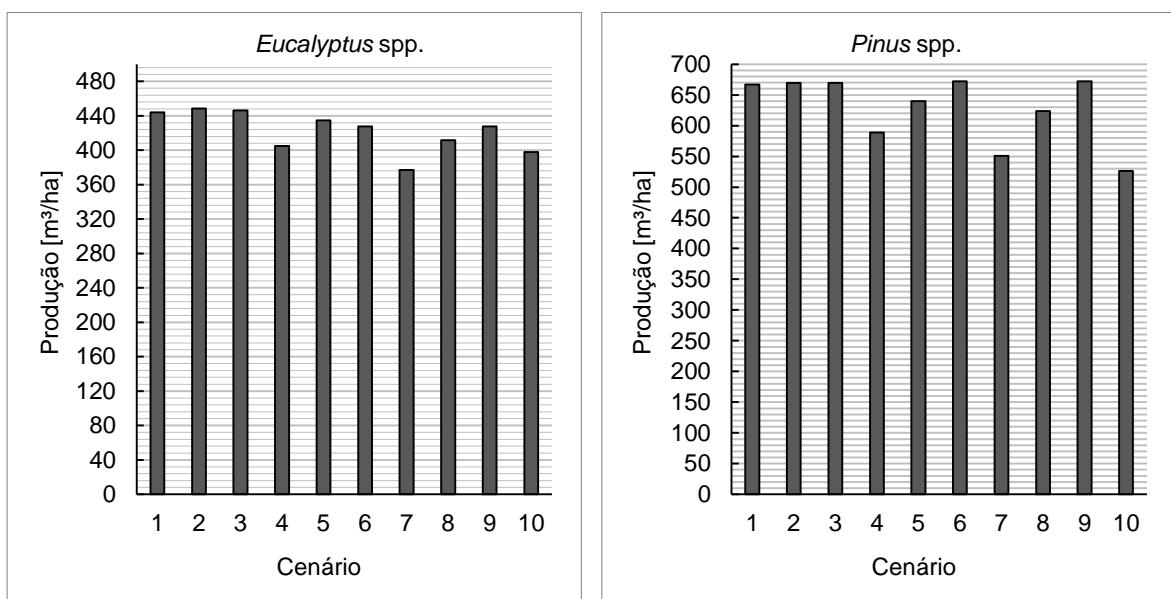
FIGURA 7 – ÁREAS DE COLHEITA POR PERÍODO DE PLANEJAMENTO, CENÁRIOS AVALIADOS E ÁREA TOTAL DE COLHEITA



As diferenças entre as áreas de colheita dos cenários avaliados estão relacionadas ao rendimento produtivo dos talhões agendados para o corte e as produções atingidas, dentro dos limites impostos de $\pm 5\%$ ou $\pm 10\%$ nas metas.

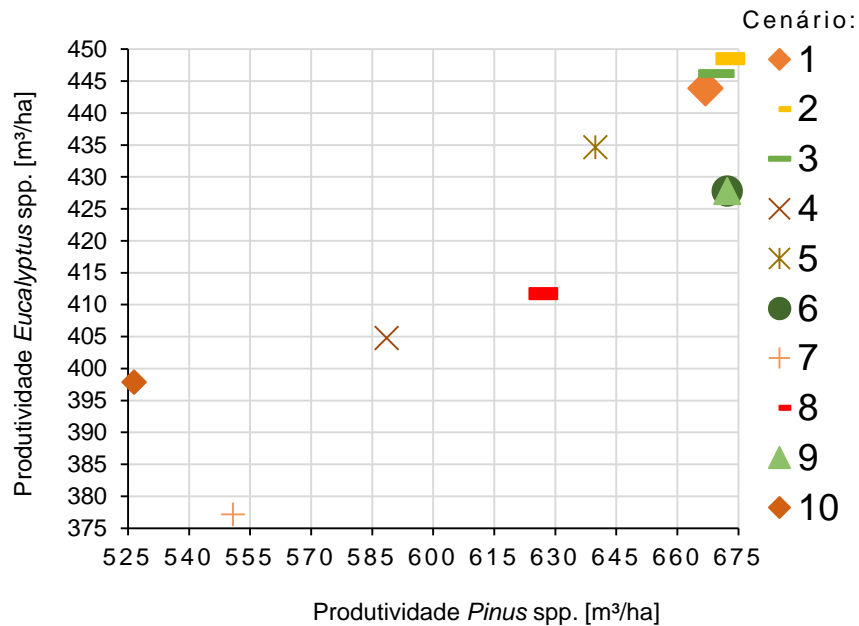
A partir das áreas de colheita e das produções dos cenários avaliados, foi calculada a produção ponderada pela área de colheita de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. para cada cenário. A Figura 8 apresenta a produção de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. dos cenários avaliados.

FIGURA 8 – PRODUÇÃO DE *Eucalyptus* spp. E *Pinus* spp. POR CENÁRIO AVALIADO



Na Figura 9 apresenta-se o desempenho produtivo dos cenários avaliados, segundo suas dispersões em função das produtividades de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp.

FIGURA 9 – DESEMPENHO PRODUTIVO DE *Eucalyptus* spp. E *Pinus* spp. POR CENÁRIO ANALISADO



De modo geral, em todos os cenários simulados a produção dos plantios de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. foi negativamente afetada pela diminuição das idades mínimas e corte, por outro lado, o aumento da produção dos plantios contrapõe-se à diminuição dos custos, por isso ao se permitir a colheita de talhões com idades menores, com a conseqüente perda de produção, os custos diminuem.

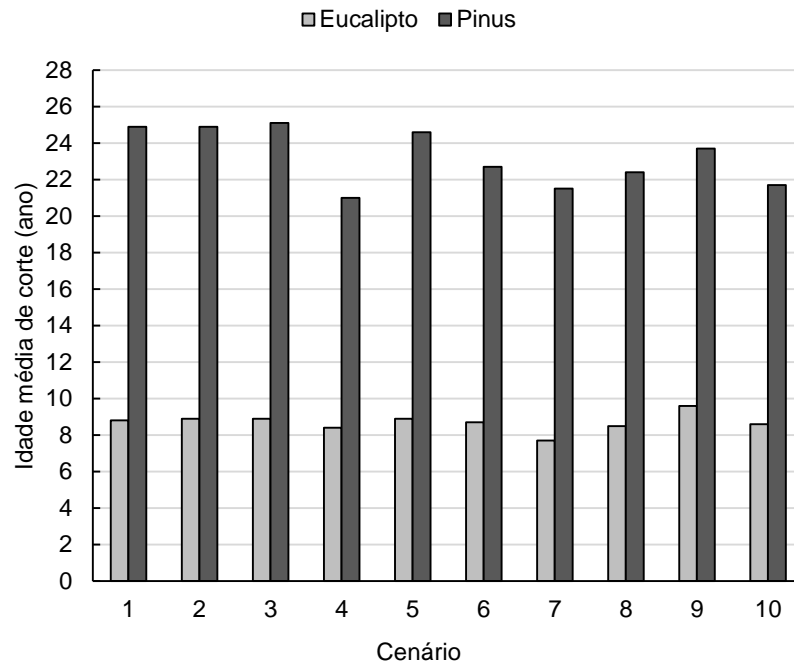
Os cenários que utilizaram o modelo *Talhão* apresentaram melhores rendimentos em comparação aos cenários que utilizaram o modelo *Misto* e o modelo *Bloco*. Isso ocorreu devido ao fato de que o modelo *Talhão* agenda individualmente os talhões para a colheita, tornando-o mais seletivo que o modelo *Bloco* e o modelo *Misto*.

Entre todos os cenários simulados, o Cenário 2 apresentou os melhores rendimentos produtivos médios, com 448 [m³/ha] de *Eucalyptus* spp. e 669 [m³/ha] de *Pinus* spp., sendo, respectivamente, 13% e 27% mais produtivo que o Cenário 10 (*Testemunha*).

4.2.1.2 Idade média e Incremento Médio Anual (IMA) comercial

A idade média de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. na ocasião da colheita foi determinada para cada cenário e é apresentada pela Figura 10.

FIGURA 10 – IDADE MÉDIA DE CORTE DE *Eucalyptus* spp. E *Pinus* spp. POR CENÁRIO ANALISADO

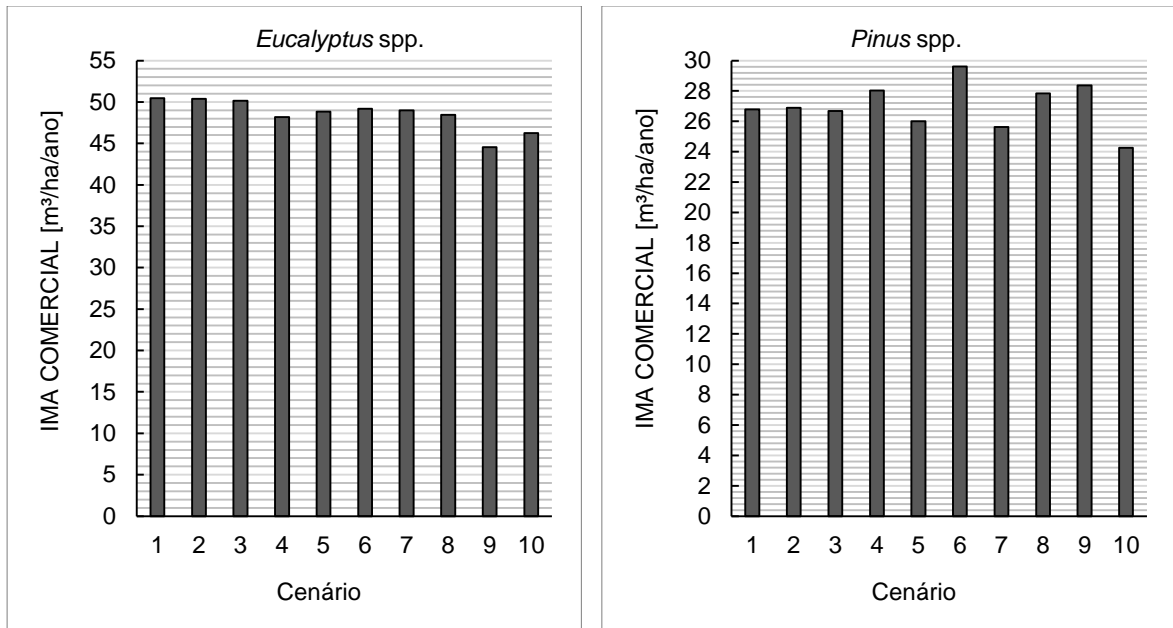


Em média, para todos os cenários simulados, as idades médias na ocasião da colheita de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. foram 8,7 e 23,4 anos respectivamente. Já no Cenário 10 (*Testemunha*) as idades médias de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. foram 8,6 e 21,7, respectivamente. Portanto, houve aumento médio de 1,1% nas idades médias de *Eucalyptus* spp. e um aumento médio de 7,8% nas idades médias de *Pinus* spp. nos cenários simulados em comparação ao Cenário 10.

As maiores idades médias na ocasião da colheita foram apresentadas pelo Cenário 3, com 8,9 e 25,1 anos para *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., respectivamente. O aumento da idade média permite que os talhões se mantenham mais tempo protegidos pela cobertura vegetal existente, que protege o solo, os recursos hídricos e o micro-habitat.

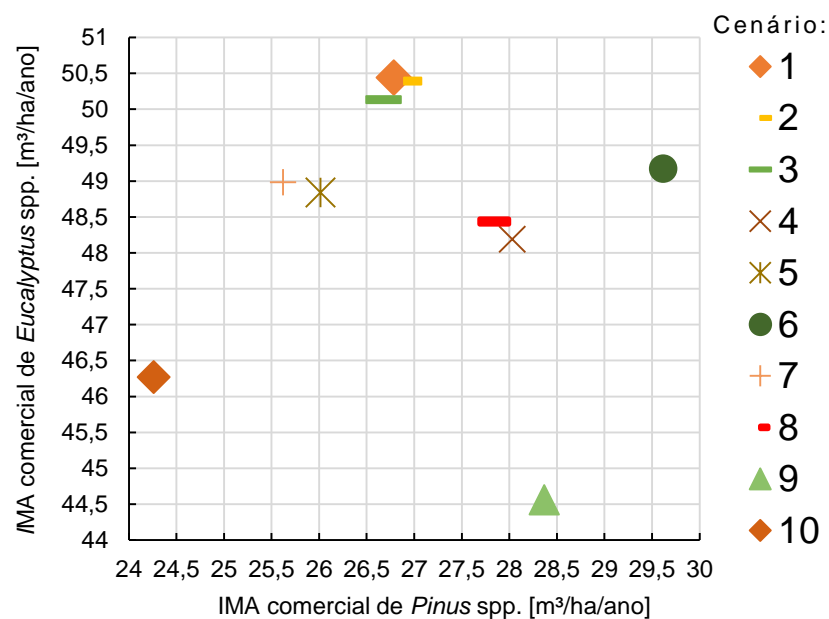
O Incremento Médio Anual (IMA) comercial na ocasião da colheita, como indicador de produtividade dos talhões de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., foi calculado em todos os cenários avaliados. Na Figura 11 estão os valores do Incremento Médio Anual (IMA) comercial de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. nos cenários avaliados.

FIGURA 11 – INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) COMERCIAL DE *Eucalyptus* spp. E *Pinus* spp. POR CENÁRIO ANALISADO



A Figura 12 apresenta o desempenho dos cenários avaliados, segundo suas dispersões em função do IMA comercial de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp.

FIGURA 12 – DESEMPENHO DO INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) COMERCIAL DE *Eucalyptus* spp. E *Pinus* spp. POR CENÁRIO ANALISADO



Em média, para todos os cenários simulados, o IMA comercial de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. foi 48,7 e 27,3 [m³/ha/ano] respectivamente, enquanto que no cenário testemunha (Cenário 10) o IMA comercial de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. foi

46,2 e 24,6 [m³/ha/ano]. Assim sendo, comparando os cenários simulados ao Cenário 10 (*Testemunha*) houve aumentos médios de 5,4% e no IMA comercial de *Eucalyptus* spp. e 10,9% no IMA comercial de *Pinus* spp. Os melhores resultados de IMA comercial de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., foram obtidos pelo Cenário 6, com 49,1 e 29,6 [m³/ha/ano], respectivamente.

4.2.2 Rede de estradas utilizada

4.2.2.1 Extensão da rede de estradas principais reformadas

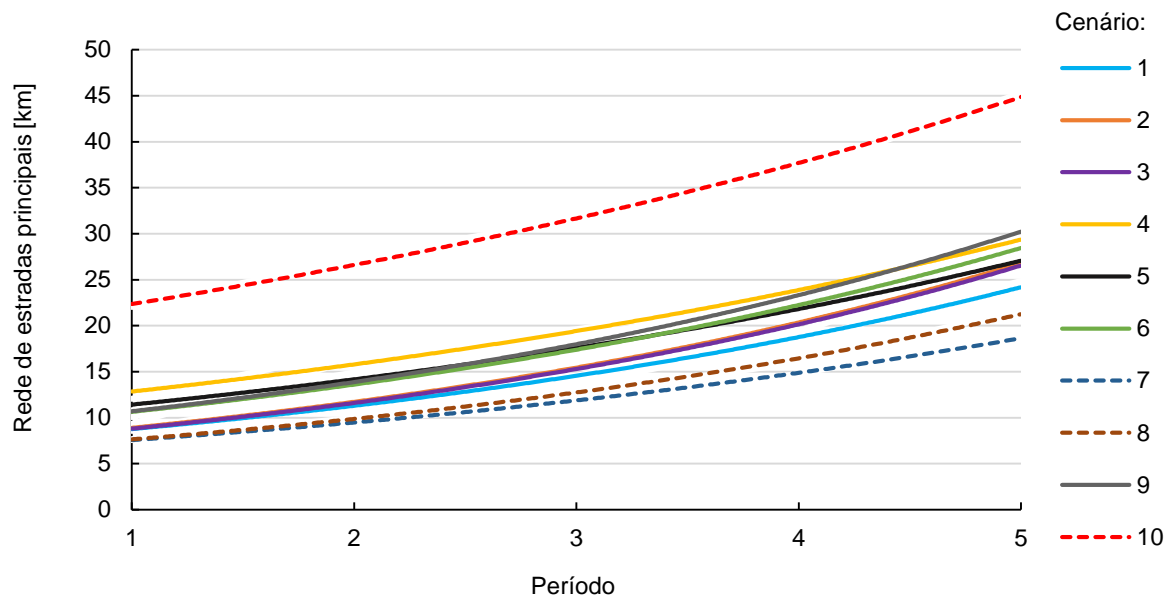
A quantidade de estradas principais reformadas para o escoamento da produção foi determinado para cada cenário e período de planejamento, sendo apresentada na Tabela 9.

TABELA 9 – SOMA DAS DISTÂNCIAS DOS TRECHOS DE ESTRADAS PRINCIPAIS REFORMADOS EM CADA CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO, EM QUILOMETROS

Cenário (nome)	Período					Total
	1	2	3	4	5	
1 (<i>Talhão Precoce</i>)	8,6	3,5	1,6	4,7	6,5	24,9
2 (<i>Talhão Semiprecoce</i>)	8,6	4,4	1,6	4,6	8,9	28,1
3 (<i>Talhão Normal</i>)	8,6	4,1	1,6	5,1	8,3	27,7
4 (<i>Misto Precoce</i>)	12,1	5,2	2,3	3,5	6,3	29,3
5 (<i>Misto Semiprecoce</i>)	10,8	4,1	3,0	4,4	3,7	26,0
6 (<i>Misto Todas</i>)	10,1	4,3	3,1	5,5	4,2	27,2
7 (<i>Bloco Precoce</i>)	7,6	2,3	1,5	3,5	4,3	19,1
8 (<i>Bloco Semiprecoce</i>)	7,7	2,3	2,6	3,4	5,8	21,8
9 (<i>Bloco Todas</i>)	9,3	6,9	2,4	4,3	5,7	28,8
10 (<i>Testemunha</i>)	22,0	5,2	4,5	5,1	8,4	45,3

Na Figura 13 é possível observar as curvas de soma acumulada da distância total da rede principal de estradas reformadas em cada cenário e período de planejamento.

FIGURA 13 – SOMA ACUMULADA DA QUANTIDADE DE ESTRADAS PRINCIPAIS POR CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO



Devido às variações de produção madeireira entre cenários nos períodos analisados, a razão entre a produção e a distância total da rede de estradas principais reformadas deve ser utilizada para inferir comparações entre cenários. A razão da produção em toneladas de madeira por metro de estrada principal reformada em cada cenário e período de planejamento, como também a média ponderada pela produção, são apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 – RAZÃO ENTRE A PRODUÇÃO MADEIREIRA E A QUANTIDADE DE ESTRADAS PRINCIPAIS REFORMADAS POR CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO EM TONELADAS/METRO

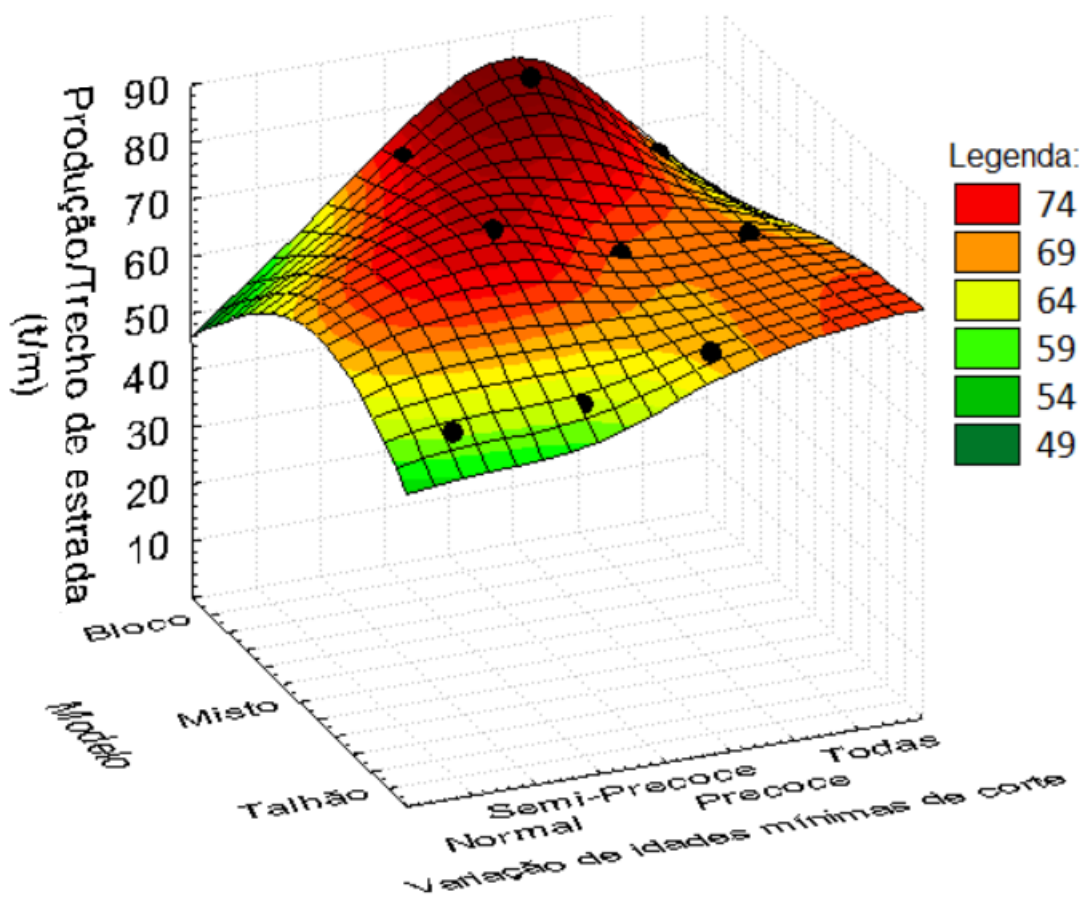
Cenário (nome)	Período					Total
	1	2	3	4	5	
1 (Talhão Precoce)	54,5	38,7	68,3	89,4	67,1	66,9
2 (Talhão Semiprecoce)	54,5	31,0	68,3	90,4	48,7	61,4
3 (Talhão Normal)	54,5	33,3	68,3	81,6	52,7	60,4
4 (Misto Precoce)	38,9	27,3	46,1	120,8	69,7	68,7
5 (Misto Semiprecoce)	43,4	33,0	35,4	96,1	117,9	76,8
6 (Misto Todas)	49,5	31,1	34,3	76,1	103,8	68,7
7 (Bloco Precoce)	60,6	64,8	70,2	111,8	96,2	84,6
8 (Bloco Semiprecoce)	56,5	56,3	39,3	115,4	69,3	74,5
9 (Bloco Todas)	48,9	18,4	44,7	97,7	78,2	67,7
10 (Testemunha)	22,4	26,5	24,3	86,2	54,1	48,9

Nos cenários simulados (Cenário 1 ao 9) a razão entre a produção madeireira e a quantidade de estradas principais reformadas aumentou em 43%, em relação ao Cenário 10 (*Testemunha*).

Comparando os modelos utilizados, os cenários que utilizaram o modelo *Bloco* (Cenário 7, 8 e 9) apresentaram em média os melhores resultados da produção por metro de estrada principal reformada; nestes cenários o aumento foi de 54,6% em relação ao Cenário 10 (*Testemunha*). Ao restringir as possibilidades de sequência de corte nos talhões por meio da colheita por blocos, concentra-se as operações de colheita, diminuindo a quantidade de estradas principais reformadas. Neste caso, os trechos de estradas principais reformados acessam no mínimo um bloco de colheita contendo dezenas de talhões, diferentemente da colheita por talhões, onde os trechos de estradas principais reformados podem acessar até somente um talhão.

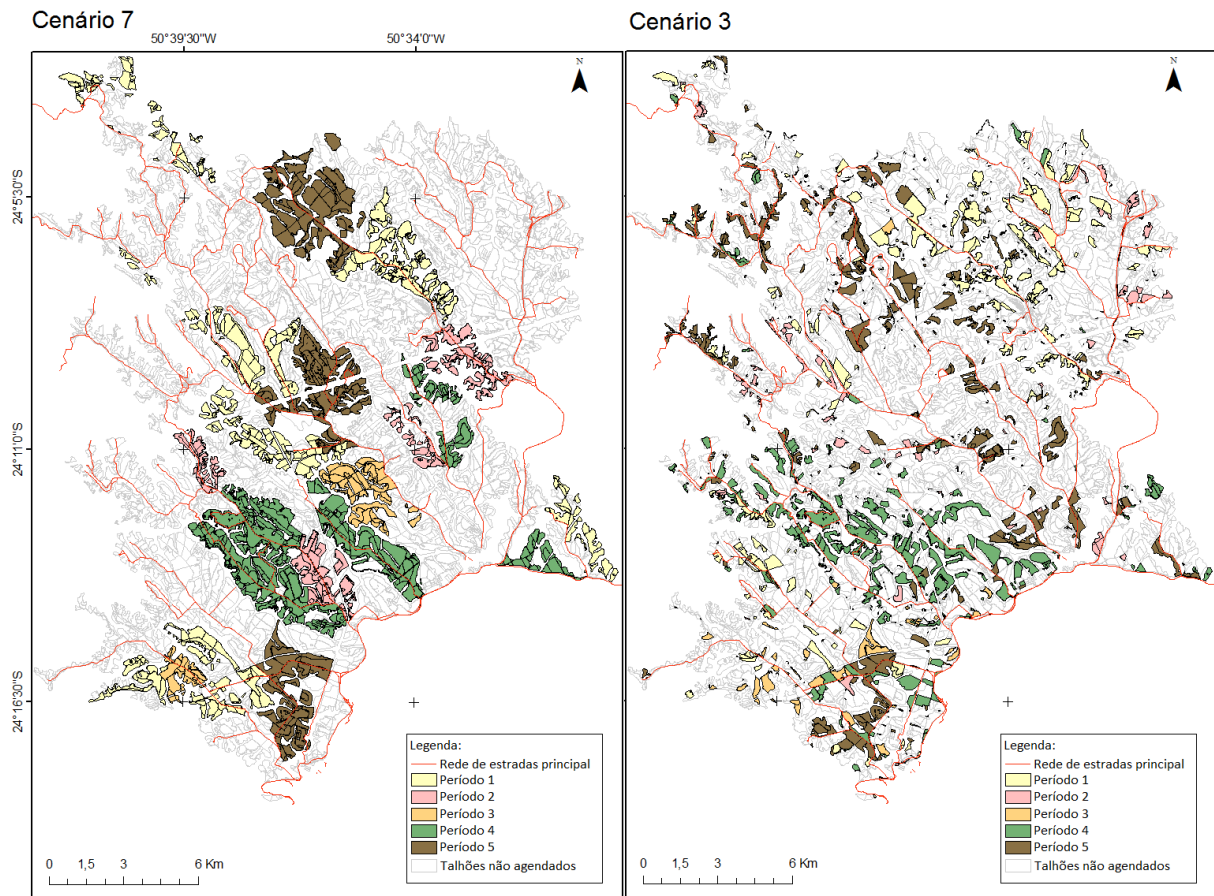
Na Figura 14 é possível observar a quantidade de produção madeireira por metro de estrada principal reformada em função do tipo de modelo utilizado e das variações de idades mínimas de corte *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp.

FIGURA 14 – QUANTIDADE DE PRODUÇÃO MADEIREIRA POR METRO DE ESTRADA PRINCIPAL REFORMADA EM FUNÇÃO DO TIPO DE MODELO UTILIZADO E DAS VARIAÇÕES DE IDADES MÍNIMAS DE CORTE DE *Eucalyptus* spp. E *Pinus* spp.



A redução das idades mínimas de corte de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. junto à concentração espacial da colheita causada pelo modelo *Bloco*, provocaram aumento na quantidade de produção madeireira por metro de estrada principal reformada. Já a dispersão da colheita causada pelo modelo *Talhão* junto ao aumento das idades mínimas de corte de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., provocam diminuição na quantidade de produção madeireira por metro de estrada principal reformada. A Figura 15 apresenta o agendamento da colheita do Cenário 7 com 84,6 [t/m] e do Cenário 3 com 60,4 [t/m].

FIGURA 15 – AGENDAMENTO DA COLHEITA DOS CENÁRIOS 7 E 3



Observa-se maior dispersão da colheita no Cenário 3, que utilizou o modelo *Talhão* e variação *Normal* de idade mínima de corte, em relação ao Cenário 7, que utilizou o modelo *Bloco* e variação *Precoce* de idade mínima de corte

4.2.2.2 Extensão da soma dos ramais de acesso construídos

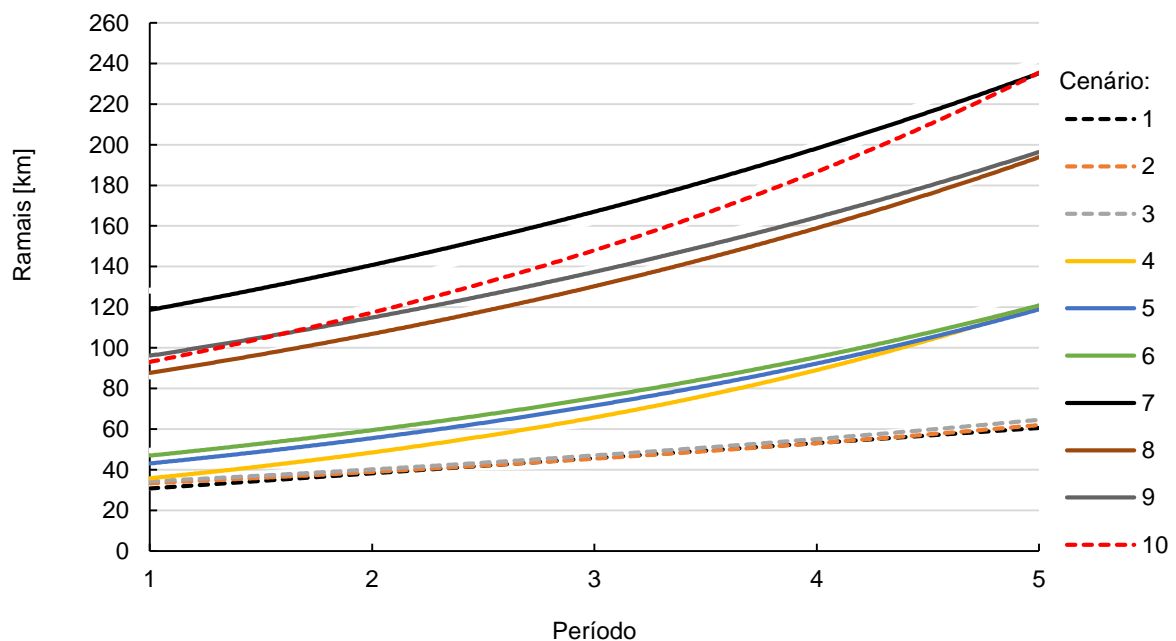
A soma das distâncias dos trechos de ramais de acesso aos talhões construídos foi determinada para cada cenário e período de planejamento, sendo apresentado na Tabela 11.

TABELA 11 – SOMA DAS DISTÂNCIAS DOS RAMAIS CONSTRUÍDOS POR CENÁRIO SIMULADO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO, EM QUILOMETROS

Cenário (nome)	Período					Total
	1	2	3	4	5	
1 (Talhão Precoce)	31,3	8,7	2,2	10,1	10,1	62,4
2 (Talhão Semiprecoce)	33,0	7,8	2,8	8,3	11,7	63,6
3 (Talhão Normal)	34,2	7,4	3,4	9,6	11,3	65,9
4 (Misto Precoce)	41,2	2,2	14,4	33,5	38,6	129,9
5 (Misto Semiprecoce)	49,3	1,0	12,4	31,9	33,3	127,9
6 (Misto Todas)	53,8	1,0	9,2	33,8	33,4	131,3
7 (Bloco Precoce)	128,1	1,0	33,2	37,9	41,7	241,9
8 (Bloco Semiprecoce)	85,9	22,6	23,8	27,1	31,8	191,2
9 (Bloco Todas)	94,9	19,6	25,2	29,1	22,2	191,0
10 (Testemunha)	93,4	27,0	18,8	53,6	42,7	235,5

Na Figura 16 é possível observar as curvas de soma acumulada dos ramais construídos em cada cenário e período de planejamento.

FIGURA 16 – SOMA ACUMULADA DA DISTÂNCIA TOTAL DOS RAMAIS POR CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO



Devido às variações de produção madeireira entre cenários nos períodos analisados a razão entre a produção e a distância total dos ramais construídos deve

ser utilizada para inferir comparações entre cenários. A razão da produção em toneladas de madeira por metro de ramal de estrada construído em cada cenário e período de planejamento, bem como a média ponderada pela produção, são apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 – RAZÃO ENTRE A PRODUÇÃO MADEIREIRA E A DISTÂNCIA TOTAL DOS RAMAIS CONSTRUÍDOS POR CENÁRIO E PERÍODO DE PLANEJAMENTO, EM TONELADAS/METRO

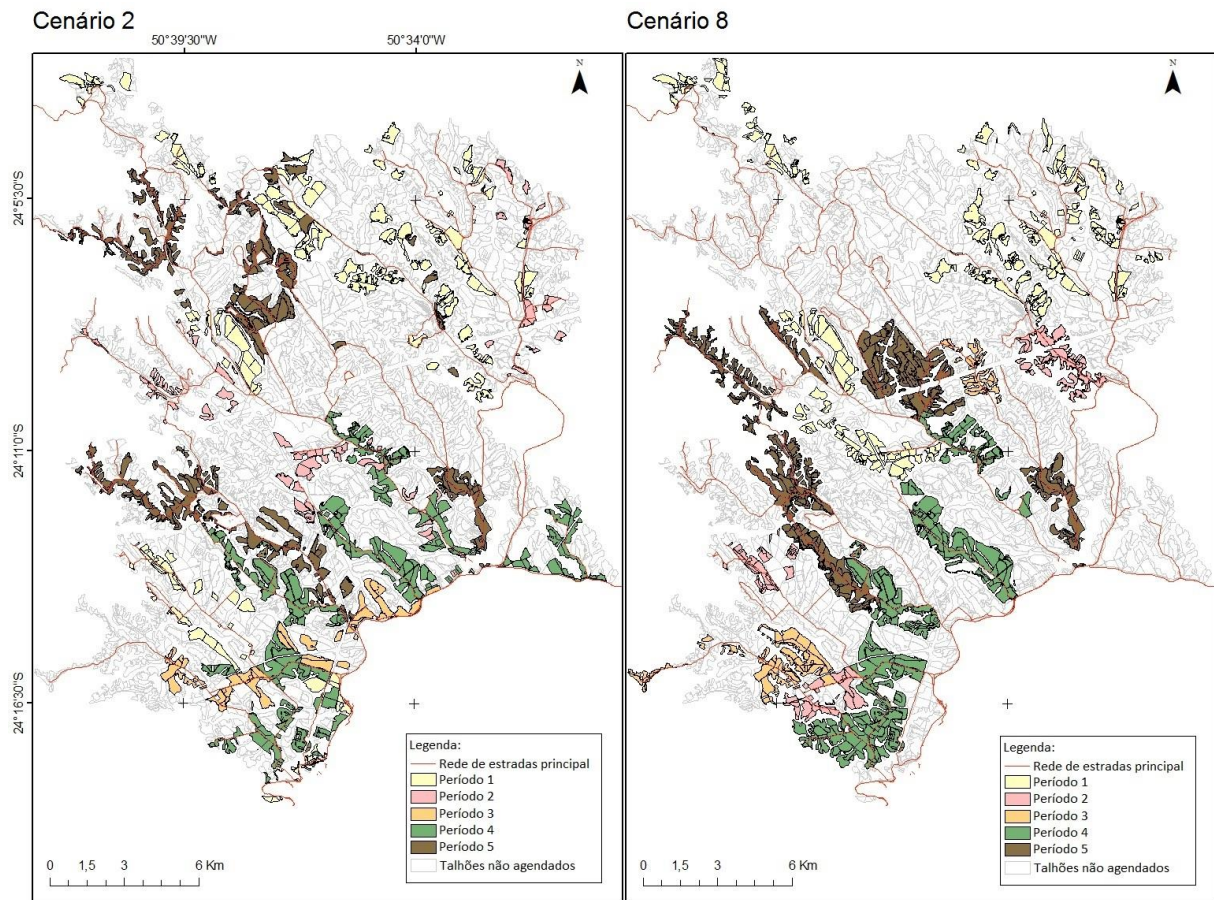
Cenário (nome)	Período					Total
	1	2	3	4	5	
1 (<i>Talhão Precoce</i>)	15,0	15,6	48,7	41,5	43,2	32,3
2 (<i>Talhão Semiprecoce</i>)	14,2	17,4	38,3	50,5	37,3	32,3
3 (<i>Talhão Normal</i>)	13,7	18,3	31,5	43,7	38,6	30,3
4 (<i>Misto Precoce</i>)	11,4	142,0	7,5	12,5	11,3	23,2
5 (<i>Misto Semiprecoce</i>)	9,5	135,7	8,6	13,1	13,1	22,4
6 (<i>Misto Todas</i>)	9,3	134,6	11,6	12,4	13,0	21,9
7 (<i>Bloco Precoce</i>)	3,6	6,5	3,1	10,2	9,9	7,3
8 (<i>Bloco Semiprecoce</i>)	5,0	5,7	4,4	14,4	12,6	9,6
9 (<i>Bloco Todas</i>)	4,8	6,5	4,3	14,6	20,1	11,9
10 (<i>Testemunha</i>)	5,3	5,1	5,8	8,2	10,7	7,6

Nos cenários simulados (Cenário 1 ao 9) a razão entre a produção madeireira e a quantidade de ramais de estradas reformados aumentou em 179%, em relação cenário testemunha (Cenário 10).

Com relação aos modelos utilizados, os cenários que utilizaram o *modelo Talhão* (Cenário 1, 2 e 3) apresentaram em média os melhores resultados de produção madeireira por metro de ramais de estrada construídos. Nestes cenários o aumento foi de 315% em relação ao planejamento tático fornecido (Cenário 10). Os talhões que se encontram distantes dos trechos de estradas principais naturalmente apresentam custos elevados de construção dos ramais de acesso, encarecendo seus custos totais de colheita.

Na Figura 17, observa-se o agendamento da colheita do Cenários 2 e Cenário 8, com 32,3 e 9,6 [t/m] de produção madeireira por metro de ramais de estrada construídos, respectivamente.

FIGURA 17 – AGENDAMENTO DA COLHEITA DOS CENÁRIOS 2 E 8



É visualmente perceptível a maior proximidade da rede de estradas principais dos talhões agendados pelo Cenário 2, que corresponde ao modelo *Talhão* e variação *Semiprecoce*, em relação ao Cenário 8, que corresponde ao modelo *Bloco* e variação *Semiprecoce*. Cenários com a mesma variação de idade mínima de corte tem disponível para a colheita exatamente os mesmos talhões.

4.2.3 Análise de custos

4.2.3.1 Custo total

Para todos os cenários analisados, o custo total corresponde a soma dos custos das operações de colheita dos talhões, de reforma da rede de estrada principais e de construção dos ramais de acesso. A Tabela 13 contém, para cada cenário, o custo total, de colheita, de reforma da rede de estradas principais e de construção dos ramais, junto às respectivas influências percentuais no total.

TABELA 13 – CUSTO TOTAL, DE COLHEITA, DAS ESTRADAS PRINCIPAIS, DOS RAMAIS E AS INFLUÊNCIAS PERCENTUAIS NO TOTAL DOS CENÁRIOS

Cenário (nome)	Custo total dos cenários [R\$]	Colheita		Estradas principais		Ramais	
		[R\$]	(%)	[R\$]	(%)	[R\$]	(%)
1 (Talhão Precoce)	15.183.428	14.473.352	95,3	398.075	2,6	312.000	2,1
2 (Talhão Semiprecoce)	15.269.524	14.501.300	95,0	450.224	2,9	318.000	2,1
3 (Talhão Normal)	15.267.090	14.494.886	94,9	442.704	2,9	329.500	2,2
4 (Misto Precoce)	15.555.549	14.447.225	92,9	469.278	3,0	639.045	4,1
5 (Misto Semiprecoce)	15.412.358	14.361.232	93,2	416.141	2,7	634.985	4,1
6 (Misto Todas)	15.533.517	14.445.746	93,0	435.736	2,8	652.035	4,2
7 (Bloco Precoce)	15.844.598	14.221.942	89,8	305.155	1,9	1.317.500	8,3
8 (Bloco Semiprecoce)	14.794.300	13.489.899	91,2	348.402	2,4	956.000	6,5
9 (Bloco Todas)	15.876.463	14.461.456	91,1	460.006	2,9	955.000	6,0
10 (Testemunha)	17.329.241	15.427.028	89,0	724.714	4,2	1.177.500	6,8
Média*	15.415.203	14.321.893	92,9	413.969	2,7	679.340	4,4

LEGENDA: * excluindo o Cenário 10

Ao analisar a participação do custo das atividades de colheita no custo total dos cenários simulados, percebe-se que essa atividade é responsável, em média, por 92,9% do custo total. Com menor influência, as atividades de reforma da rede de estradas principais e construção de ramais foram responsáveis, em média, por 7,1% do custo total. No Cenário 10, que corresponde ao cenário testemunha, os custos com as atividades de colheita e rede de estradas principais junto à construção de ramais representaram 89% e 11%, respectivamente, do custo total. Os cenários simulados apresentaram, em comparação ao Cenário 10, uma participação 3,9% menor dos custos relacionados à rede de estradas no custo total.

4.2.3.2 Custo unitário de produção

O custo unitário de produção, como ferramenta de planejamento de custos e indicador da produção, foi calculado para todos os cenários analisados. O custo unitário por tonelada de madeira produzida foi calculado em função da divisão do custo do projeto [R\$] pela produção madeireira (toneladas). A Tabela 14 apresenta o valor dos projetos, as produções totais e os custos unitários de produção para todos os cenários.

TABELA 14 – VALOR DO PROJETO, PRODUÇÃO TOTAL, CUSTO UNITÁRIO DE PRODUÇÃO E A VARIAÇÃO À TESTEMUNHA

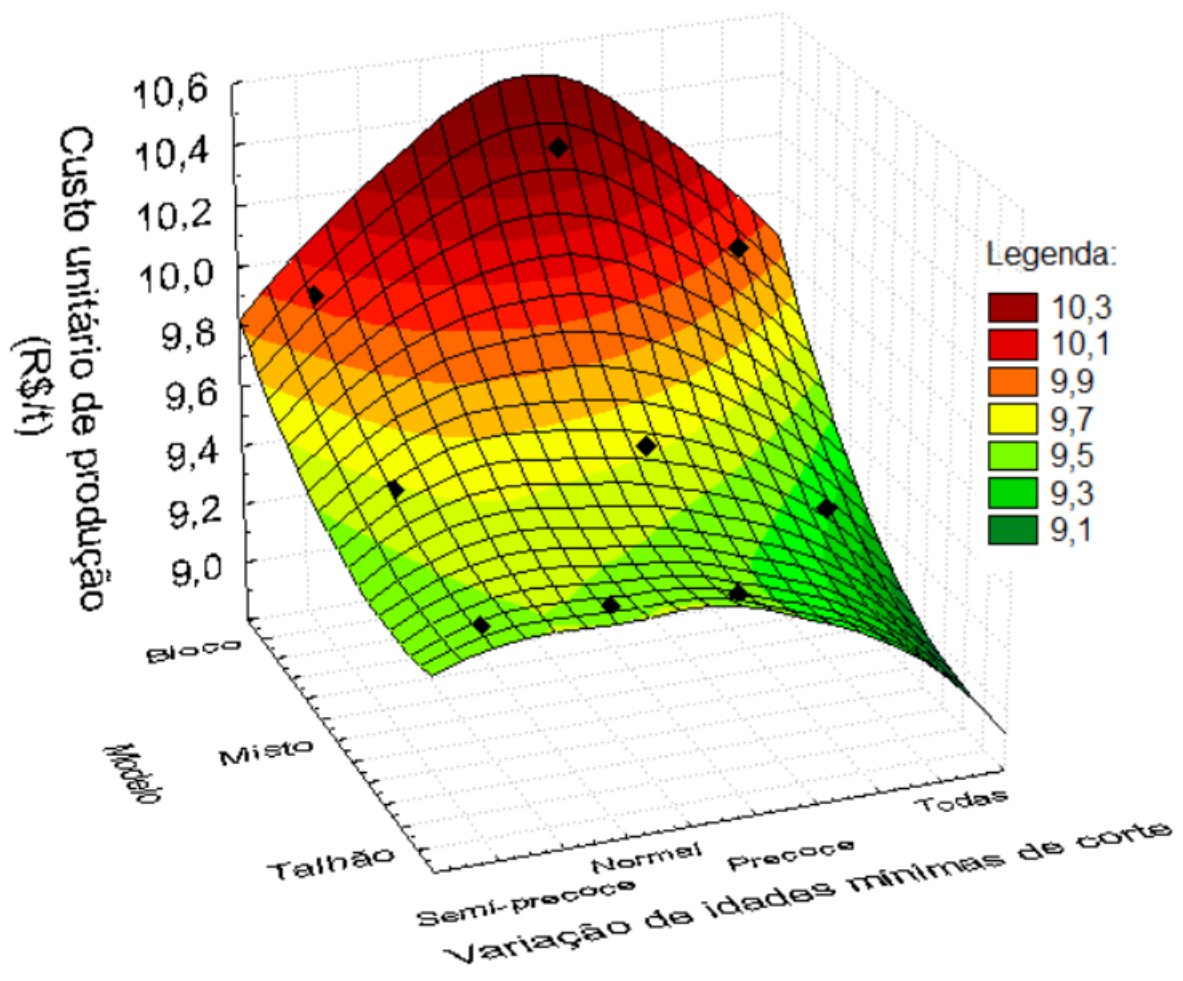
Cenário (nome)	Custo total dos cenários [R\$]	Produção total [t]	Custo unitário de produção [R\$/t]	Varição à Testemunha (%)
1 (Talhão Precoce)	15.183.428	1.567.646	9,69	-8,3
2 (Talhão Semiprecoce)	15.269.524	1.567.610	9,74	-7,8
3 (Talhão Normal)	15.267.090	1.567.600	9,74	-7,8
4 (Misto Precoce)	15.555.549	1.574.369	9,88	-6,5
5 (Misto Semiprecoce)	15.412.358	1.567.400	9,83	-6,9
6 (Misto Todas)	15.533.517	1.595.707	9,73	-7,9
7 (Bloco Precoce)	15.844.598	1.510.197	10,49	-0,7
8 (Bloco Semiprecoce)	14.794.300	1.457.586	10,15	-3,9
9 (Bloco Todas)	15.876.463	1.563.210	10,16	-3,9
10 (Testemunha)	17.329.241	1.639.419	10,57	0,0
Média*	15.415.203	1.552.369	9,93	-6,1

LEGENDA: * excluindo o Cenário 10

Todos os cenários simulados (cenários 1 ao 9) apresentaram o custo unitário de produção inferior ao cenário testemunha (Cenário 10). Em média, houve uma diminuição de 6,1% no custo unitário de produção.

Na Figura 18 é possível observar a variação do custo unitário de produção em função do tipo de modelo utilizado e das variações de idades mínimas de corte de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp.

FIGURA 18 – COMPORTAMENTO DO CUSTO UNITÁRIO DE PRODUÇÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE MODELO UTILIZADO E DAS IDADES MÍNIMAS DE CORTE DE *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp.

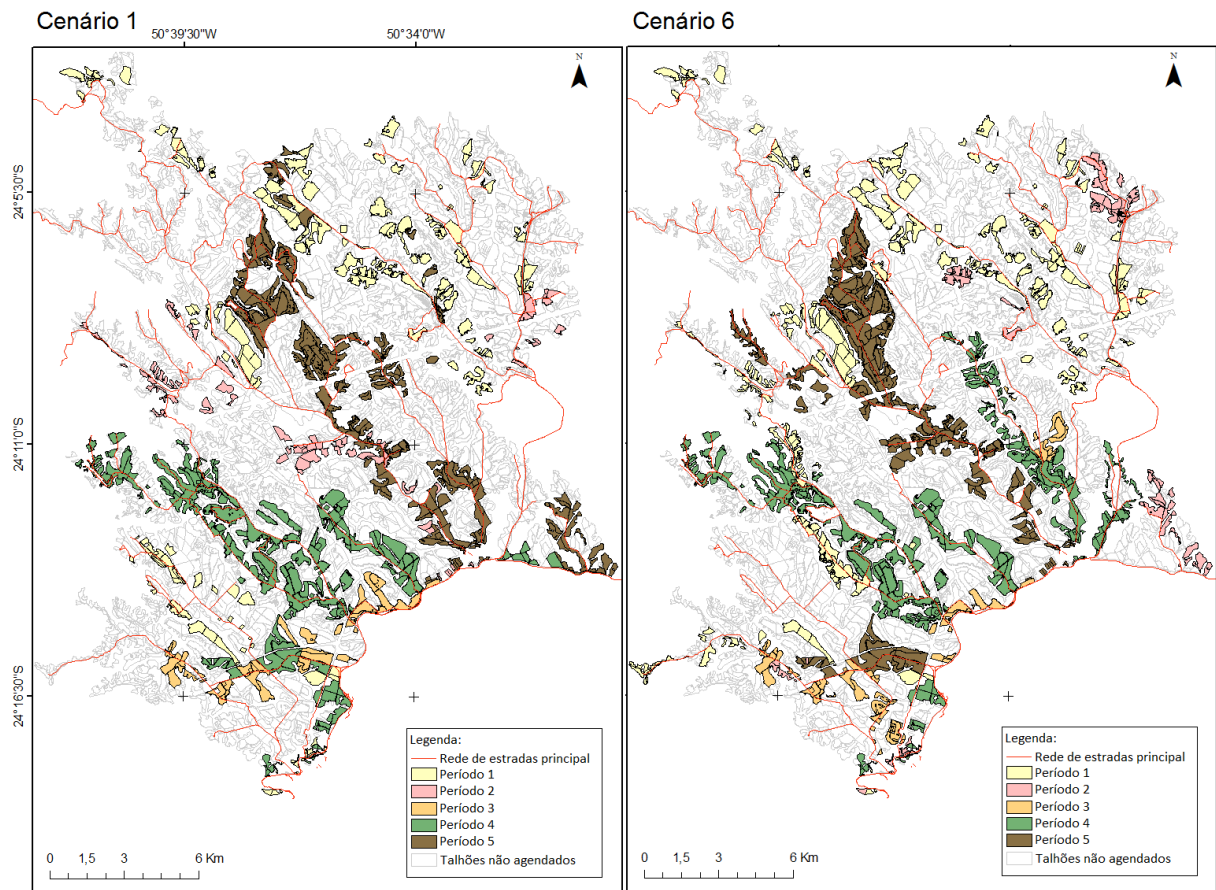


Com relação aos modelos utilizados, os cenários que utilizaram o modelo *Talhão* (Cenário 1, 2 e 3) apresentaram, em média, o menor custo unitário de produção, com uma diminuição média de 8,0% em relação ao planejamento tático da empresa (Cenário 10), dentre os três cenários, o Cenário 1 apresentou o menor custo unitário de produção, no valor de 9,69 [R\$/t]. A obtenção de menores custos unitários de produção nestes cenários se explica pela liberdade de fragmentar espacialmente a colheita, o que possibilita escolher livremente os talhões mais produtivos para o corte e diminuir a quantidade de ramais construídos em relação aos demais cenários. Portanto, o agendamento dos talhões de forma mais otimizada nesses cenários refletiu na diminuição dos custos de produção.

Por outro lado, o Cenário 6, com o custo unitário de 9,73 [R\$/t] diminuiu 7,9% o custo unitário de produção em comparação ao Cenário 10. Este resultado é explicado pela abrangência do modelo *Misto* utilizado quanto às classes de idade e

variáveis de decisão consideradas, que influenciam na otimização da agenda de corte dos talhões refletindo na diminuição do custo unitário de produção. A Figura 19 contém o agendamento da colheita do Cenário 1, que utilizou o modelo *Talhão* e variação *Precoce* e do Cenário 6, que utilizou o modelo *Misto* e todas as variações de idades mínimas de corte.

FIGURA 19 – AGENDAMENTO DA COLHEITA DOS CENÁRIOS 1 E 6



As diminuições das idades mínimas de corte junto à livre fragmentação espacial da colheita correspondida pelo modelo *Talhão* provocam a redução do custo unitário de produção. Por outro lado, o modelo *Misto*, apresentando menor dispersão da colheita, a incorporação de todas as variações de idades mínimas de corte dos blocos de colheita na formulação do modelo, provocou a redução do custo unitário de produção.

5 CONCLUSÕES

Os modelos de PLIM formulados como ferramentas de suporte à tomada de decisões de planejamento tático da colheita em plantações industriais de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. diminuem, em média, 0,64 [R\$/t] (6,1%) o custo unitário de produção, em relação ao plano tático fornecido pela empresa.

O modelo *Bloco*, comparado ao modelo *Talhão*, diminuiu, em média, 13% a quantidade utilizada de estradas principais e o rendimento produtivo de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. em 9,1% e 7,9% respectivamente.

A redução das idades mínimas de corte da variação *Semiprecoce* para a *Precoce*, diminui, em média, a quantidade utilizada de estradas principais em 3,5% e o rendimento produtivo de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. em 5,3 e 10,3%, respectivamente.

O modelo *Misto* é o mais versátil dos modelos formulados, por permitir o maior controle espacial sobre as unidades de manejo, representadas na forma de blocos e talhões.

O principal indicador de desempenho é o custo unitário de produção, por integrar os custos de manutenção da rede de estrada e de colheita das unidades de manejo.

O método proposto para geração das restrições de reforma dos trechos de estradas principais, aplicando o algoritmo de Floyd-Warshall, mostra-se eficaz na formulação de modelos IRPM de manejo florestal via PLIM, significativamente distinto dos casos anteriores apresentados por Palma e Nelson (2014), Andalaft et al. (2002) e Nelson (2001).

As soluções inteiras obtidas com uso dos modelos PLIM são muito próximas da melhor existente, portanto, métodos de aproximação não são requeridos. Isso sugere que a metodologia pode ser aplicada na colheita florestal integrada à rede de estradas.

Com o avanço da tecnologia nos hardwares e softwares de computador, mais pesquisas devem se concentrar nos métodos computacionais de geração de modelos de PLIM para resolver problemas de colheita florestal, considerando cada vez mais, aspectos intrínsecos dos processos produtivos sustentáveis.

Em trabalhos futuros, recomenda-se a inclusão de novos conjuntos de restrições que permitam as possibilidades de construção de novos trechos de estradas principais na área de estudo, a obtenção dos custos relacionados à reforma e construção de

cada trecho de estrada, que podem variar em relação à condição do trecho de estrada e em relação à quantidade de produção que será escoada no período analisado.

Outro fator importante, a ser proposto para trabalhos futuros, é a inclusão de novos conjuntos de restrições espaciais que representem a regulação do direcionamento das frentes de corte em cada período analisado. Neste caso, adicionalmente, recomenda-se a adoção de escalas temporais menores, como por exemplo, a escala mensal.

REFERÊNCIAS

- ABRAF. Planejamento Estratégico do Setor de Florestas Plantadas – 2012. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arg_editor/file/camaras_setoriais/Florestas_plantadas/1RE/App_Planjamento_ABRAF.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2015.
- AKAY, A. E. A New Method of Designing Forest Roads. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 28, n. 4, p. 273-279, 2004.
- AKAY, A. E.; ARUGA, K.; BETTINGER, P.; SESSIONS, J. Using Optimization Techniques in Designing Forest Roads and Road Networks. **Bartın Orman Fakültesi Dergisi**, Turquia, v. 15, n. 1, p. 49-62, 2013.
- ANDALAFT, N.; ANDALAFT, P.; GUIGNARD, M.; MAGENDZO, A.; WAINER, A.; WEINTRAUB, A. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and lagrangean relaxation. **Operational Research**, v. 51, n. 4, p. 613-628, 2002.
- ANDERSON, A. E.; NELSON, J. Projecting vector-based road networks with a shortest path algorithm. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 7, p. 1444-1457, 2004.
- ANDERSSON, D. **Approches to Integrated Strategic/tactical forest planning**. 29f. Licentiate Thesis - Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, 2005.
- ARCE, J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização de custos**. 134 f. 1997. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- ARUGA, K.; SESSIONS, J.; AKAY, A.; CHUNG, W. **Optimizing horizontal and vertical alignments of forest roads using a high resolution DEM**. 2004. Trabalho apresentado no 12. *International Mountain Logging Conference*. Vancouver, British Columbia, 2004.
- ASSOCIATION OF EUROPEAN OPERATIONAL RESEARCH SOCIETIES. **What is Operational Research?** Disponível em: <<http://www.euro-online.org/display.php?page=what>>. Acesso em: 30 mar. 2015.
- BANHARA, J. R.; **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático**. 166f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest Planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2, p. 145-173, 2005.

BETTINGER, P.; SESSIONS, J.; JOHNSON, K. N. Ensuring the compatibility of aquatic habitat and commodity production goals in eastern Oregon with a Tabu search procedure. **Forest Science**, v. 44, n. 1, p. 96-112, 1998.

BINOTI, D. H. B.; DA SILVA BINOTI, M. L. M.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M.; DE OLIVEIRA, M. L. R.; CAMPOS, J. C. C.; RIBEIRO, C. A. Á. S. Regulação de florestas equiâneas com restrição de classes de idade por compartimento. **CERNE**, v. 20, n. 4, p. 567-573, 2014.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, K.J. **Decision methods for forest resources management**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2003.

CARVALHO, B. M. P. S. **Algoritmo de Dijkstra**. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Setor de Engenharia de Informática, Universidade de Coimbra, Portugal, 2003.

CARVAJAL, R.; CONSTANTINO, M.; GOYCOOLEA, M. VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A. **Imposing Connectivity Constraints in Forest Planning Models**. 2012. Não publicado. Disponível em: <<http://www.pitt.edu/~jvielma/publications/OLDGROWTH10.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2015.

CHURCH, R. L.; MURRAY A. T.; WEINTRAUB, A. Spatial restrictions in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 45, n. 1, p. 45-52, 1998.

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J. G. A New Mixed-Integer Programming Model for Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions. **Operational Research**, v. 56, n. 3, p. 542-551, 2008.

CORMEN, T H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Algoritmos: Teoria e Prática**. 6. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 1990.

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

DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C. Making Forestry Decisions with Multiple Criteria: A Review and an Assessment. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 3222-3241, 2008.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, n. 1, p. 269-271, 1959.

FORSBERG, M.; FRISK, M.; RÖNNQVISTY, M. "FlowOpt—a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry. **International Journal of Forest Engineering**, v. 16, n. 2, p. 101-114, 2005.

GAIOSO, R.; Paula, L. C. M. Paralelização do algoritmo Floyd-Warshall usando GPU. In: SIMPÓSIO EM SISTEMAS COMPUTACIONAIS, 14., 2013, Goiânia, **Anais...** Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2013. p. 19-25.

- GOMIDE, L. R.; **Planejamento Florestal Espacial**. 235f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A. T.; BARAHONA, F.; EPSTEIN, R.; WIENTRAUB, A. Harvest Scheduling subject to maximum area restrictions: Exploring the exact approaches. **Operational Research**, v. 53, n.3, p.490-500, 2005.
- GUIGNARD, M.; RYU, C.; SPIELBERG, K. Model tightening for integrated timber harvest and transportation Planning. **European Journal of Operational Research**, v. 111, p. 448-460, 1998.
- GUIMARÃES, H. S. A logística como fator decisivo das operações de colheita de madeira e transporte florestal. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 13., 2004, Curitiba. **Anais....** Curitiba: UFPR/FUPEF, 2004. p. 127-146.
- GUNN, E. A.; RICHARDS E. Optimizing stand level forest harvesting using a tradeoff objective function. In: FREID, J.; VASIEVICH, J.M.; LEEFERS, L. **Proceeding of the Seventh symposium on systems analysis in forest resources**. Michigan: Bellaire, 1997. p. 28-31.
- HARISH, P.; NARAYANAN, P. J. Accelerating large graph algorithms on the GPU using CUDA. **High performance computing–HiPC**, v. 4873, n. 1, p.197-208, 2007.
- HILLER, F. S.; LIBERMAN, G. J. **Introduction to operational research**. 8 ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
- HOUGARDY, S. The Floyd–Warshall algorithm on graphs with negative cycles. **Information Processing Letters**, v. 110, n. 8, p. 279-281, 2010.
- ICHIHARA, K.; TANAKA, T.; SAWAGUCHI, I.; UMEDA, S.; TOYOKAWA, K. The method for designing the profile of forest roads supported by genetic algorithm. **Journal of Forest Research**, v. 1, n. 1, p. 45-49, 1996.
- JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives--discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 23, Supplement 18, p. a0001-z0001, 1977.
- KANGAS, A.; KANGAS, J.; KURTTILA, M. **Decision support for forest management**. 16. ed. London: Springer Science & Business Media, 2008.
- KIRBY, M. W., HAGER, W. A. Wong, P. Simultaneous Planning of Wildland Management and Transportation Alternatives. **TIMS Studies In The Management Sciences**, v. 21, p. 371-387, 1986.
- LANTHIER, M.; NUSSBAUM, D.; SACK, J. Parallel implementation of geometric shortest path algorithms. **Parallel Computing**, v. 29, n. 10, p. 1445-1479, 2003.

LOPES, S. E. Avaliação técnica e econômica de um “skidder” operando em diferentes produtividades e distâncias de extração. **Ciências e Agrotecnologia**, v.33, n.6, p. 1621-1626, 2009.

MACHADO, C. C.; Lopes, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C (Ed.). **Colheita Florestal**. Viçosa, MG: Imprensa Universitária, 2002. p. 169-213.

MALINOVSKI, R. A. **Modelo Matemático Para Otimização Dos Custos Operacionais De Transporte De Toras Com Base Na Qualidade De Estradas**. 180f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MCDILL, M. E. An Overview of Forest Management Planning and Information Management. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The Management of Industrial Forest Plantations**. London: Springer, 2014. P. 27-59.

MITCHELL, S. A. **Operational Forestry Harvest Scheduling Optimization – A mathematical model and solution strategy**. 252f. Thesis - University of Auckland, Auckland, 2004.

MURRAY, A. T. Spatial restriction in harvest scheduling. **Forest Science**, v.45, n.1, p.45-52, 1999.

NELSON, J. D. Assessment of forest harvest blocks generated from operational polygons and forest cover polygons in tactical and strategic planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, p. 682-693, 2001.

NELSON, J.; BRODIE, D. J. Comparison of a random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest planning. **Canadian Journal of Forestry**, v.20, n. 7, p. 934-942, 1990.

PALMA, C. D.; NELSON, J. D. A robust model for protecting road-building and harvest-scheduling decisions from timber estimate errors. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 137-148, 2014.

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. **Técnicas de Otimização**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

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

SESSIONS, J.; BETTINGUER, P. Hierarchical planning pathway to the future? In: INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY COOPERATIVE SYMPOSIUM, 1., 2001, Seattle. **Proceedings...** Seattle: USDA Forest Service, 2001. p. 185-190.

SHAN, Y.; BETTINGER, P.; CIESZEWSKI, C. J.; LI, R. T. Trends in spatial forest planning. **Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences**, Georgia, v.1, n. 2, p. 86-112, 2009.

SOUZA, D. O. **Algoritmos Genéticos Aplicados ao Planejamento do Transporte Principal de Madeira**.169f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

TAN, J. Locating forest roads by a spatial and heuristic procedure using microcomputers. **Journal of Forest Engineering**, v. 10, n. 2, p. 91-100, 1999.

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.; BARE, B. B. New issues in forest land management from an operations research perspective. **Interfaces**, v. 26, n. 5, p. 9-25, 1996.

WEINTRAUB, A.; MURRAY, A. T. Review of combinatorial problems induced by spatial forest harvesting planning. **Discrete Applied Mathematics**, v. 154, n. 5, p. 867-879, 2006.

YOGARATNAM, K. **Exploring the Limits of GPUs With Parallel Graph Algorithms**. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - Universidade de Carleton, Ottawa, Ontario, Canadá, 2010.