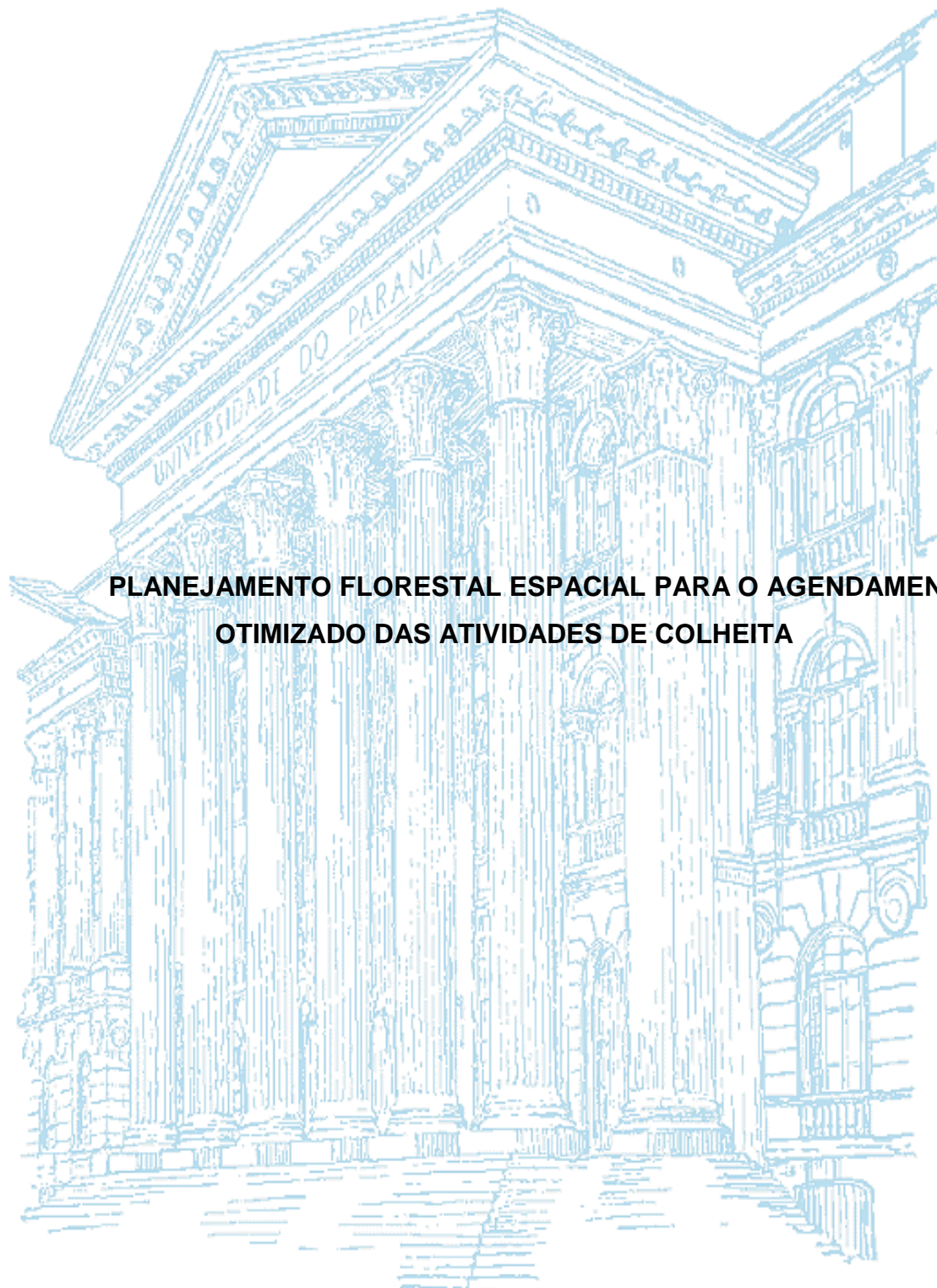


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA BUSSOLO STANG



**PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL PARA O AGENDAMENTO
OTIMIZADO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA**

CURITIBA

2016

MARIANA BUSSOLO STANG

**PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL PARA O AGENDAMENTO
OTIMIZADO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA**

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

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce
Coorientador: Prof. Dr. Sebastião Amaral Machado

CURITIBA

2016

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

Stang, Mariana Bussolo

Planejamento florestal espacial para o agendamento otimizado das atividades de colheita / Mariana Bussolo Stang. – Curitiba, 2016.

55 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Prof. Dr. Sebastião Amaral Machado

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 22/03/2016.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Florestas - Planejamento. 2. Manejo florestal - Programação linear. 3. Colheita florestal. 4. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Machado, Sebastião Amaral. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.62

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARIANA BUSSOLO STANG**, intitulada: "**PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL PARA O AGENDAMENTO OTIMIZADO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA**", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 22 de Março de 2016.



Prof JULIO EDUARDO ARCE (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof ALLAN LIBANIO PELISSARI (UFPR)



Prof EDILSON BATISTA DE OLIVEIRA (EMBRAPA)



À minha mãe, Maria Bussolo e,
às minhas irmãs, Maiara Bussolo
Stang e Morgana Bussolo Stang.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me encorajar para iniciar e prosseguir nesta caminhada.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo suporte financeiro.

À empresa Arauco do Brasil S/A, pela disponibilização dos dados.

Ao professor Julio Eduardo Arce, pela orientação e ao professor Sebastião Amaral Machado, pela coorientação e dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

À minha família querida que nunca deixou de acreditar em todos momentos da minha vida.

Ao meu namorado João Mauricio, pelo incentivo constante e apoio durante os momentos mais difíceis.

Aos colegas do curso de pós-graduação, em especial à Ana Paula, Jéssica e Viviane, pela agradável convivência e amizade.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma participaram desta etapa da minha vida.

"Que nada atrapalhe meu passo, faça perder meu riso, nem abale a minha fé. Que os caminhos sejam iluminados, os obstáculos superados e as lutas vencidas. Que os sonhos sejam degraus para as vitórias."

Carlos Adriano

RESUMO

Nas últimas duas décadas, o planejamento do manejo florestal tomou foco nas decisões orientadas espacialmente, devido à introdução de detalhes espaciais, tais como a construção de estradas e as preocupações ambientais, como a proteção dos animais selvagens, a biodiversidade, a redução da erosão e a melhora da qualidade da água. Um desafio é o de expressar essas preocupações em modelos matemáticos. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo matemático para o planejamento florestal espacial do agendamento das atividades de colheita e resolvê-lo com o uso do *software* CPLEX, utilizando-se o método “*Branch and Bound*” para problemas de programação linear com variáveis inteiras. Por razões de regulação, 38 blocos foram formados *a priori* a partir de talhões com área média de 7,25 ha, não excedendo uma área total definida de 350 ha por bloco. A área total colhida foi de 5.989 ha e o volume gerado foi de 2.956.913 m³ em um período de 5 anos. Os resultados foram avaliados considerando que todas as restrições foram atendidas e mostraram-se superiores na comparação com o planejamento tradicional testemunha. A formulação exata proposta mostrou bons resultados em testes computacionais e foi eficiente ao otimizar a colheita florestal, o que faz reduzir os custos com o transporte e o impacto ambiental, sendo aspectos importantes no âmbito sustentável.

Palavras-Chave: Sistema de informação geográfica. Colheita de madeira. Planejamento florestal tático. Programação linear.

ABSTRACT

In the last two decades, the forest management planning has taken focus on spatially oriented decisions, due to the introduction of spatial details, such as the construction of roads and environmental concerns, such as wildlife protection, biodiversity, reduction of erosion and improvement of water quality. A challenge is to express those concerns in mathematical models. In this context, the aim of this study was to develop a mathematical model for the spatial forest planning of harvesting activities scheduling and solve it using the CPLEX software, with the "Branch and Bound" method for linear programming problems with integer variables. For reasons of regulation, 38 blocks have been formed in advance from stands with average area of 7.25 hectares and does not exceed a given total area, in this case 350 hectares, harvesting a total area of 5.989 hectares and volume of 2.956.913 m³ in five years. This makes it possible to reduce the movement of machinery within the area and reduce the costs of construction and maintenance of roads. The results were evaluated taking into account all constraints were met and shown to be superior compared to traditional planning control. The exact wording proposed showed good results in computational tests and is effective to optimize forest harvesting reducing the costs of transport and environmental impact, important aspects of the sustainable level.

Keywords: Geographic Information System. Timber harvesting. Tactical forest planning. Linear programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA FLORESTAL DA FAZENDA MORUNGAVA EM SENGÉS.....	31
FIGURA 2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE SENGÉS	32
FIGURA 3 - DEMANDA VOLUMÉTRICA EM MILHARES DE M ³ POR CLASSE DE SORTIMENTO POR PERÍODO	37
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS BLOCOS COM PERÍODOS DE COLHEITA INDIVIDUAIS.....	40
FIGURA 5 - AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA PARA OS 5 ANOS DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO	43
FIGURA 6 - PLANEJAMENTO ANUAL TESTEMUNHA	45
FIGURA 7 - MAPA DE COMPARAÇÃO PARA O TERCEIRO ANO DO HP. A) OTIMIZADO E B) TESTEMUNHA.....	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA	33
TABELA 2 - TABELA DE PRODUÇÃO POR ÍNDICE DE SÍTIO PARA <i>Pinus taeda</i> NA FAZENDA MORUNGAVA (m ³ /ha)	34
TABELA 3 - VALORES DE INCREMENTO MÉDIO ANUAL (m ³ /ha/ano) POR ÍNDICE DE SÍTIO PARA <i>Pinus taeda</i>	34
TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS SORTIMENTOS	36
TABELA 5 - DEMANDA ANUAL DE PRODUÇÃO POR PERÍODO E PRODUTOS CONSIDERADOS	37
TABELA 6 - REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ BxB (DISTÂNCIA EM KM) PARA OS 10 PRIMEIROS BLOCOS	41
TABELA 7 - RESUMO DOS RESULTADOS PELO SOFTWARE CPLEX	42
TABELA 8 - BLOCOS SELECIONADOS PARA CADA ANO DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO COM O TOTAL DA ÁREA	44

LISTA DE SIGLAS

ARM	–	Area Restriction Model
FSC	–	Forest Stewardship Council
HP	–	Horizonte de Planejamento
IMA	–	Incremento Médio Anual
PL	–	Programação Linear
PLI	–	Programação Linear Inteira
PLIM	–	Programação Linear Inteira Mista
PO	–	Pesquisa Operacional
SIG	–	Sistema de Informações Geográficas
URM	–	Unit Restriction Model

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 PESQUISA OPERACIONAL E O PLANEJAMENTO FLORESTAL	16
2.2 PLANEJAMENTO TRADICIONAL X ESPACIAL.....	17
2.3 PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO DA COLHEITA FLORESTAL.....	18
2.4 MANEJO DA PAISAGEM.....	20
2.5 AGENDAMENTO DA COLHEITA	22
2.6 RESTRIÇÕES ESPACIAIS	23
2.7 MODELOS MATEMÁTICOS	25
2.7.1 Modelos de programação linear para o planejamento florestal	25
2.7.2 Programação linear inteira	27
2.7.3 Técnicas para resolução de PPLI.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	31
3.2 ESPECIFICAÇÃO DOS DADOS.....	32
3.3 GERAÇÃO DOS BLOCOS DE COLHEITA	35
3.4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	36
3.5 MODELO PROPOSTO.....	37
3.5.1 Função Objetivo	38
3.5.2 Restrições	38
3.6 HARDWARE E SOFTWARE UTILIZADOS.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Os gestores florestais estão cada vez mais confrontados com problemas complexos e diversos sobre o uso dos recursos florestais. Assim, as práticas de manejo sustentável são essenciais para garantir que esses recursos continuem disponíveis para uso das gerações atuais e futuras. Isso fez surgir uma análise incorporando objetivos e considerações específicos, sendo destinados à minimizar o impacto das atividades florestais. Uma das abordagens de planejamento do manejo tem sido a inclusão de restrições espaciais na análise do agendamento da colheita, porque qualquer atividade em uma determinada unidade de manejo poderia impactar outras unidades relacionadas espacialmente.

Os principais aspectos no agendamento da colheita florestal são o tempo e o espaço. O aspecto temporal é importante para o fornecimento de madeira de boa qualidade, de acordo com a demanda do mercado e ao mesmo tempo manter o suficiente na floresta para o futuro. A estrutura espacial da floresta refere-se ao arranjo espacial dos povoamentos florestais, unidades de colheita e interconexões entre eles (BASKENT; KELES, 2005). Também desempenha papel importante na prestação de serviços ambientais (KURTTILA, 2001) e não pode ser omitida no agendamento da colheita florestal.

Em grandes áreas de plantios florestais, o planejamento da colheita nas unidades de manejo envolve preocupações com o deslocamento da frente de corte e o transporte da madeira, além do impacto ambiental causado pela atividade. Esta visão integrada da floresta tem ganhado atenção ao longo dos anos, no que se trata das áreas contíguas de colheita formadas pelas unidades de manejo (GOMIDE, 2009). O arranjo espacial das áreas de colheita tornou-se, assim, uma preocupação fundamental para o planejamento do manejo florestal (BASKENT; KELES, 2005).

Segundo Murray e Church (1995), o agendamento de colheita e otimização de estradas exigem, em grande parte, o conhecimento da interação entre as unidades, muitas vezes representado através da utilização de restrições de adjacência. Consequentemente, o planejamento florestal espacial tem como característica a geração de problemas com muitas restrições e variáveis de decisão inteiras. Essas variáveis representam decisões sobre estradas e unidades de colheita em planos operacionais. A partir da decisão das quantidades de colheita,

deve-se determinar quando e quais unidades, bem como quando e quais as estradas serão usadas para acessar essas áreas.

As restrições de adjacência têm um impacto significativo sobre a aceitabilidade de alternativas de planejamento florestal, o que obrigam os analistas a procurar métodos eficazes para a incorporação de tais preocupações. Várias tentativas têm sido sugeridas para representar restrições de adjacência dentro de formulações de problemas de planejamento. Neste contexto, a Programação Linear surge como uma importante ferramenta no auxílio à tomada de decisão (AUGUSTINCZIK, 2014). Segundo o mesmo autor, a Programação Linear (PL) é uma ferramenta matemática de otimização aplicada na resolução de vários tipos de problemas que envolvem planejamento, com uma gama de aplicações na área florestal, assim como no planejamento da colheita florestal.

É realmente um desafio expressar por meio de modelos matemáticos problemas que envolvem o tamanho, forma e distribuição de unidades de manejo (talhões, blocos de colheita, habitat dos animais selvagens e classe de idade), os limites mínimo e máximo do tamanho do bloco de colheita, as restrições de adjacência, a conectividade e a proximidade de estradas (BASKENT; KELES, 2005).

Além de conhecer detalhadamente o seu patrimônio florestal, as empresas florestais devem ter a habilidade de formular modelos matemáticos que representem de forma fidedigna a presente realidade e, assim, simular diversos cenários, otimistas e pessimistas, fundamentados nas tendências de mercado. Depois disso, pode-se, então, formular estratégias adequadas e tomar decisões atuais que preparam a organização para o futuro. Essa visão antecipada das oportunidades ou dos problemas separam as empresas bem administradas das mal administradas. O aumento do consumo de produtos de madeira reforça a necessidade da produção de florestas de rápido crescimento para atender essa demanda (SANTOS, 2012).

Ao analisar a estrutura de organização das empresas ao longo das décadas, observa-se que o foco de suas atividades objetiva a sustentabilidade do empreendimento e dos recursos como um todo (ROCHA, 2002). Essa afirmativa se encaixa perfeitamente no planejamento de qualquer empresa florestal, onde uma série de atividades é programada com a finalidade de gerar recursos financeiros/produtos no prazo estipulado de planejamento (GOMIDE, 2009). O planejamento florestal é caracterizado por uma complexidade considerável,

envolvendo diferentes graus de incerteza. Contudo, nele se baseiam as decisões que resultam consequências econômicas, ecológicas e sociais.

Por este motivo, os modelos de agendamento de colheita vêm crescendo em importância no planejamento florestal, uma vez que podem ser utilizados para equacionar tanto questões de produtividade quanto de preservação. O agrupamento das atividades de colheita em blocos visa a concentração e conectividade das áreas florestais, de modo a reduzir a movimentação das máquinas de colheita entre os talhões selecionados para o corte raso em um mesmo ano do horizonte de planejamento, bem como a eficiência no uso das estradas florestais. Alternativas para incluir requisitos de conectividade de área em modelos de planejamento florestal sempre são úteis, tendo em vista a escassa pesquisa que trata da agregação das atividades de colheita.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral desenvolver um modelo matemático para o planejamento florestal espacial, visando o agendamento das atividades de colheita.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Agrupar talhões em blocos de colheita, de modo a formar áreas mais concentradas e contínuas, evitando o espalhamento da colheita;
- Definir as áreas máximas e mínimas de colheita, considerando a demanda da empresa;
- Minimizar a distância média de transporte de madeira, diminuindo a dispersão dos blocos de colheita;
- Propor o agendamento da colheita dentro de um horizonte de planejamento de cinco anos, otimizando o uso das estradas; e
- Comparar os resultados do planejamento espacial com o tradicional obtido por meio de dados gerados com o cenário testemunha.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PESQUISA OPERACIONAL E O PLANEJAMENTO FLORESTAL

A pesquisa operacional (PO) pode ser conceituada como um método científico que fornece ferramentas quantitativas, a fim de auxiliar nos processos de tomada de decisão (AUGUSTO, 2005). O surgimento da PO ocorreu em função da necessidade do desenvolvimento de técnicas de otimização do uso de recursos limitados, bem como para constituir estratégias militares mais eficientes durante a Segunda Guerra Mundial (LISBOA, 2002). Porém, o marco definitivo para a consolidação da Pesquisa Operacional veio com a publicação de Dantzig em 1947 do método simplex para a programação linear, o qual permanece em utilização até os dias atuais (PUCCINI, 1990).

Na área florestal, essa ferramenta vem sendo utilizada para resolver problemas de planejamento desde a década de 1960. Foram, entretanto, os estudos de Navon (1971), trabalhando para o Serviço Florestal Americano, e Ware e Clutter (1971), na Universidade da Geórgia em colaboração com a indústria de celulose do Sul dos EUA, que marcaram o início da aplicação da programação linear no planejamento florestal (RODRIGUES, 2006). A Pesquisa Operacional vem contribuindo muito no planejamento florestal, uma vez que modelos de planejamento abrangem um número muito grande de variáveis, assim como várias decisões devem ser tomadas ao longo do tempo (ALONSO, 2003).

Carnieri (1989) destacou que o sucesso de um modelo em pesquisa operacional para o planejamento florestal depende do nível de adequação à realidade do problema. Essa “imitação da realidade” deve ser aceitável pelo planejador florestal, pois, caso contrário, o modelo matemático construído não conseguirá representar todas as variáveis importantes do trabalho. As variáveis envolvidas em problemas de planejamento florestal são geralmente correlacionadas e de origem diferente, algumas biológicas, econômicas, sociais, assim como ambientais, sendo que qualquer mudança em uma delas trará influência sobre as outras.

2.2 PLANEJAMENTO TRADICIONAL X ESPACIAL

De acordo com Rodriguez et al. (1997), a gestão do recurso florestal baseia-se nas intervenções florestais em cada unidade de manejo, ocasionando mudanças na estrutura da floresta e na geração de recursos financeiros. As operações de manejo florestal, como desbastes, podas e corte raso, as necessidades do mercado como qualidade, comprimento de toras, as operações de transportes e de roteamento de veículos, são atividades definidas previamente pelo planejador florestal.

No passado, os manejadores procuravam encontrar o ótimo de cada talhão, ou seja, a melhor alternativa de manejo para um talhão a cada análise. O resultado para esse tipo de visão proporcionava problemas na estrutura da floresta, dificultando o estabelecimento de um plano de suprimento de madeira (GOMIDE, 2009).

Gomide (2009) afirma que a partir da década de 1970, os aspectos ambientais e sociais passaram a ganhar importância entre os países consumidores de produtos florestais, exigindo mudanças na conduta dos processos produtivos. Essa mudança afetou a maneira de se formular os problemas florestais tradicionais, pois agora outras ideias eram consideradas. Desta maneira, o controle das relações espaciais na floresta passou a ser uma das questões mais pesquisadas e o planejamento florestal ganhou uma nova versão, sendo denominado de planejamento florestal espacial.

Uma abordagem importante é proibir a colheita de áreas contíguas maiores do que um valor especificado, semelhante ao que foi originalmente proposto por Thompson et al. (1973). Normalmente, esse limite é de 49 hectares (ha), mas pode variar dependendo da região a ser estudada.

Segundo a American Forest and Paper Association (2001) a *Sustainable Forestry Initiative* exige que as florestas privadas nos Estados Unidos sejam manejadas de modo que o tamanho médio das clareiras de áreas de colheita não deve exceder 120 acres. Isso corresponde a aproximadamente 49 hectares, o que faz com que talhões maiores do que esta área, sejam divididos em talhões menores.

Um modelo matemático tradicional difere de um modelo espacial em pelo menos dois aspectos. Primeiro em um modelo tradicional, cada talhão deve ser tratado como um componente individual, enquanto que em um modelo espacial, os

talhões muitas vezes são agregados em estratos ou blocos ou divididos como resultado de técnicas de modelagem utilizadas. Depois, um modelo espacial incorpora posições relativas dos talhões no controle da distribuição geográfica da colheita. Além disso, um modelo de manejo florestal espacial fornece medidas da estrutura espacial e o desempenho da floresta em nível de paisagem (BASKENT; JORDAN, 1991).

O planejamento espacial identifica e expõe os componentes da paisagem, auxiliando em uma tomada de decisão mais consciente sobre os aspectos ecológicos do ecossistema. Neste ponto, algumas restrições são introduzidas no modelo matemático para permitir essa ação. Assim, como exemplo de restrições tem-se áreas de conexão entre os fragmentos, distância entre blocos explorados, distribuição de estradas e outros itens importantes na redução de impactos (GOMIDE, 2009).

2.3 PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO DA COLHEITA FLORESTAL

Como uma das principais etapas do processo de tomada de decisão, o planejamento florestal, organizado de forma hierárquica, procura analisar as possíveis alternativas disponíveis para elaborar os planos de manejo de longo prazo, bem como constituir as metas a serem atendidas em médio e curto prazo. Dentre as operações florestais, a operação de colheita destaca-se como item principal da avaliação nos planos de manejo, devido ao seu alto grau de impacto nos três aspectos base da sustentabilidade (BANHARA, 2009).

O planejamento florestal é idealizado por um processo de tomada de decisão de natureza hierárquica. Essa estrutura é dividida em três principais níveis, como o planejamento estratégico, tático e operacional (GUNN, 1991; MURRAY; CHURCH, 1995; SESSIONS; BETTINGER, 2001). No planejamento estratégico, os objetivos são definidos a longo prazo. As condições são geralmente ajustadas para ser maior do que uma rotação e meia de idade das espécies dominantes em uma unidade de planejamento. No planejamento tático, um planejador florestal "traduz" os objetivos estratégicos em metas para o período e decide quais as medidas que serão realizadas e quais os meios à usar para alcançar esse objetivo. O comprimento do horizonte de planejamento tático é executado geralmente a partir de um a dois períodos. No planejamento operacional, a execução das atividades

operacionais, detalhadas a nível de talhão, é planejada em uma base anual ou sazonal (VAN RAFFE, 2000; SESSIONS; BETTINGER, 2004).

Segundo Ohman (2001), tradicionalmente, as considerações de relações espaciais não estão incluídas no planejamento ao nível estratégico e são reconhecidos em níveis inferiores da hierarquia de planejamento. A colheita e as atividades silviculturais estão programadas na fase de planejamento tático para atender restrições espaciais definidas no espaço e no tempo.

As ações representativas de colheita podem ser em nível de corte raso, desbaste sistemático ou seletivo de um talhão, sendo esse essencialmente, o foco de modelos estratégicos (CHURCH et al., 2000; KENT et al., 1991). Em contraste com a orientação estratégica, o planejamento em nível tático normalmente tem um horizonte de tempo mais curto e se concentra nas áreas ou árvores a serem colhidas (WEINTRAUB; MURRAY, 2006). Por exemplo, um plano estratégico pode identificar toda a área dedicada aos diferentes usos e quantidades específicas de diferentes tipos de madeira a serem colhidas. Nesse nível de planejamento, geralmente não é dada atenção à exata localização geográfica onde essas atividades ocorrem (KENT et al., 1991; JAMNICK e WALTERS, 1993).

Os níveis operacional e tático de planejamento se concentram em onde e quando um tratamento, colheita, preservação, etc., devem ser prescritos ou agendados. A estrutura de análise responsável por ligar esses diferentes níveis é conhecida como uma hierarquia de planejamento, onde diferentes decisões e questões são abordadas em diferentes níveis, tanto espaciais como organizacionais, de processos de gestão florestal (HOF, 1993; CHURCH et al., 2000).

O agendamento da colheita florestal é normalmente parte integrante do manejo florestal e apresenta como objetivos a definição da agenda de corte das unidades, auxiliando na regulação da floresta (HOTVEDT, 1983). Assim, ele pode ser enquadrado dentro do planejamento operacional ou tático da colheita florestal, a depender principalmente do horizonte de trabalho. Geralmente, o planejamento tático apresenta uma escala em torno de 2 a 5 anos do horizonte de planejamento, segundo a espécie manejada e utiliza alguns resultados do planejamento estratégico (MITCHELL, 2004). Conforme Gomide (2009), nesse estágio é definido o tipo de alternativa de manejo adotada para cada talhão e é realizada uma análise de oferta e demanda do mercado e dos tipos de produtos desejados pelos consumidores. As

metas de produção volumétrica são importantes e devem ser alcançadas nessa fase a partir do agendamento da colheita.

Um aspecto importante do planejamento tático se refere à inclusão de restrições espaciais. Essas restrições representam limitações físicas para a operação de colheita ou questões ambientais. Sendo assim, a escolha de um determinado talhão para colheita depende da seleção de talhões vizinhos em períodos anteriores, sendo considerada, dessa forma, a adjacência entre talhões (MITCHEL, 2004; SESSIONS; BETTINGER, 2001).

Para Weintraub e Murray (2006), no nível tático, as decisões envolvem o período do planejamento, durante o qual, cada unidade será colhida, a fim de satisfazer as demandas futuras esperadas, necessitando definir as estradas de acesso às unidades colhidas. Isso adiciona características espaciais para o processo de planejamento e requer modelos de programação linear (PL) com variáveis binárias (0 e 1).

2.4 MANEJO DA PAISAGEM

Atualmente, surgem no setor florestal mundial, técnicas que se utilizam de conceitos de planejamento da paisagem e que incorporam em suas operações, a preocupação em manter ou melhorar a qualidade visual em suas áreas. O uso dessas técnicas se reflete diretamente num melhor balanço entre as práticas da silvicultura e a manutenção da qualidade ambiental, com a vantagem de melhorar a imagem do setor florestal privado no país, incluindo o aproveitamento dos plantios e áreas de preservação permanente para usos, como a recreação e a melhoria da qualidade estética das rodovias (MAGRO, 1996).

Para Magro (1996), embora as críticas aos reflorestamentos no Brasil sejam poucas e a demanda por áreas naturais para atividades recreativas não atinja as proporções encontradas nas cidades de países de clima temperado, tudo indica que esse cenário estará mudando num curto prazo. Os indicativos são os processos de certificação florestal e o crescimento do turismo ao nível mundial. Embora muitas empresas do setor florestal já tenham adotado a utilização de técnicas adequadas de produção e conservação, são poucas aquelas que tenham se dedicado ao manejo da paisagem, visando melhorar sua qualidade visual.

A paisagem florestal é um mosaico espacial de limites arbitrários que contêm áreas distintas que interagem funcionalmente (TURNER, 1989). A estrutura espacial, ou paisagem, refere-se ao arranjo espacial relativo de manchas e interconexões entre eles. Ela representa ambas as características espaciais e não-espaciais de elementos da paisagem e suporta um número de funções e processos (BASKENT; JORDAN, 1995). O planejamento florestal espacial examina os padrões e as tendências no desenvolvimento espacial das paisagens florestais e concentra-se em atividades de manejo florestal e nas ferramentas específicas utilizadas para desenvolver, implementar e avaliar planos florestais e políticas alternativas (BETTINGER; SESSIONS, 2003).

Segundo Bettinger e Sessions (2003), a estrutura espacial da paisagem florestal é facilmente expressa e compreendida através de representações gráfica ou cartográfica. Embora o sistema de informação geográfica (SIG), sensoriamento remoto, processamento de imagens e outras ferramentas, podem ajudar nos esforços de planejamento florestal espacial, essas ferramentas são tipicamente usadas para fornecer dados espaciais para o processo de planejamento ou para efetuar análises posteriores do planejamento da floresta.

A função do SIG é a capacidade de responder questões geográficas com base nas informações em mapas digitais com banco de dados associado. Tem sido tradicionalmente utilizado na silvicultura para armazenar mapas em formato eletrônico e para fazer cálculos, tais como a área e a distância. Mais recentemente, seu uso foi estendido para análises de uso potencial de terra e outros problemas complexos, que têm um contexto espacial (DAVIS et al., 2001).

De acordo com Seixas e Magro (1998), inúmeros são os impactos sobre a paisagem durante a operação da colheita florestal, sendo um deles a agressão cênica ao público, que estava anteriormente acostumado a imagem de milhares de árvores ocupando o seu espaço visual.

Na literatura são observados diversos tipos de modelos e restrições designadas a modelar espacialmente a paisagem florestal. O agendamento da colheita florestal é sempre retratado nestes estudos, sendo uma atividade que reflete diretamente o design e a estrutura da paisagem (GOMIDE, 2009).

2.5 AGENDAMENTO DA COLHEITA

É interessante notar as semelhanças entre planejamento da colheita com a estrutura espacial, uma área que recebe considerável atenção na pesquisa operacional (WEINTRAUB; MURRAY, 2006). O agendamento da colheita florestal é um típico problema de planejamento, onde usualmente são envolvidas diversas opções de manejo representadas pelas variáveis de decisão do modelo matemático. Neste caso, a questão é estabelecer uma agenda de colheita para um período pré-definido, através da seleção de talhões presentes nas áreas florestais. Geralmente, esses problemas têm como objetivo a maximização de uma função de lucro ou receita, vinculada a restrições de produção volumétrica (GOMIDE, 2009).

O modelo de agendamento da colheita tem sido utilizado para tratar preocupações com estradas, além de questões ambientais, que incluem a proteção da vida selvagem, redução da erosão e preservação da beleza cênica (MARTELL et al., 1998). A forma espacial da colheita desempenha um papel importante na maneira como as questões do meio ambiente podem ser modeladas. A maior restrição que normalmente é imposta refere-se a não colher excessivamente uma área em particular, isso é realizado através da limitação de áreas contíguas de colheita (MURRAY, 1999).

Por outro lado, a formação de blocos também é uma questão fundamental no planejamento da colheita. O tamanho, a localização e o período de colheita dos talhões afeta diretamente o desenvolvimento e estrutura da floresta. Considerações a respeito de áreas de abertura, proximidade com outras áreas de colheita e o período de corte são fatores críticos para assegurar os níveis de retorno econômico e de sustentabilidade da floresta. Com a finalidade de cumprir com várias restrições de colheita, o gestor encarregado da formação de blocos se depara com um grande desafio (WALTERS, 1996).

O planejamento de suprimento de madeira é normalmente parte integrante do manejo florestal, tendo como objetivos definir a agenda de corte das unidades e auxiliar na regulação da floresta (HOTVEDT, 1983). O seu agendamento representa um ponto estratégico para a empresa florestal, onde se dimensiona uma série de atividades de logística e procedimentos técnicos, em virtude da sequência de talhões agendados para a colheita. Nos dias atuais, agendamento de colheita vai

além da simples preocupação com a produção de madeira e a capitalização de recursos financeiros.

2.6 RESTRIÇÕES ESPACIAIS

Diferentes atividades de manejo em uma determinada unidade de planejamento podem muitas vezes influenciar unidades adjacentes. Por exemplo, a atividade de corte raso de um povoamento ou unidade de colheita pode expor um povoamento vizinho ou a vida selvagem, problemas de drenagem e deterioração do solo (SNYDER; REVELLE, 1996). Por essas razões, restrições espaciais são muitas vezes impostas às atividades de colheita em povoamentos de florestas adjacentes ou unidades de colheita (BASKENT; KELES, 2005).

No momento da colheita, muitas vezes se faz necessária a consideração de condições que assegurem a dispersão da colheita, seja essa necessidade baseada em aspectos ambientais ou para atender a exigências legais que regulamentam a extensão da floresta que pode ser colhida no período (ALONSO, 2003).

Entretanto, a adoção de políticas de restrição da área máxima, inicialmente proposta para beneficiar a vida selvagem, pode resultar em significativos efeitos negativos causados pela fragmentação das áreas florestais (MCDILL; REBAIN, 2003). Um efeito potencial da dispersão das áreas de colheita é a redução do habitat interior da floresta, e o aumento do perímetro das áreas florestais, causando efeitos de borda (GUSTAFSON, 1996).

Além dos efeitos sobre o habitat, a dispersão das áreas de colheita provoca efeitos negativos sobre as operações da colheita florestal. A movimentação das máquinas entre talhões acarreta na ocorrência de horas improdutivas das máquinas, aumentando o tempo demandado para a operação e conseqüentemente o custo. Também, é difícil a logística para a construção e manutenção das estradas, pois o maquinário e os materiais envolvidos também necessitam de maior movimentação e tempo (AUGUSTYNCZIK, 2014).

Notadamente, a eficiência das atividades de colheita, envolvendo a organização do maquinário e transporte de toras, é significativamente melhorada quando os talhões estão agregados (SMALTSCHINSKI et al., 2012).

Para assegurar essas condições, considera-se, no modelo de planejamento restrições de adjacência. Este tipo de restrição exige o uso de variáveis binárias

para que se possa garantir a adjacência. Para resolver este problema pode-se optar entre os métodos exatos de programação linear inteira binária ou a utilização de técnicas heurísticas (ALONSO, 2003).

Conforme Zhu et al. (2007), as abordagens mais utilizadas para resolver esse tipo de questão são as abordagens URM e ARM. A abordagem URM (*Unit Restriction Model*) impede que talhões adjacentes sejam colhidos no mesmo ano do horizonte de planejamento. A abordagem ARM (*Area Restriction Model*) leva em consideração a área dos talhões, permitindo que talhões contíguos sejam colhidos no mesmo ano do horizonte de planejamento, desde que a área do bloco formado não exceda a área máxima de corte raso determinada. A abordagem ARM tem uma formulação mais complexa quando comparada à abordagem URM.

Segundo Vielma et al. (2007), a abordagem ARM é um modelo que incorpora blocos de colheita à otimização. Com o auxílio do Sistema de Informações Geográficas (SIG), é possível formar blocos de colheita, adicionando unidades de manejo ao bloco, até que sua área se aproxime da área máxima de corte raso. Assim, após a formação desses blocos, caso um seja colhido, evita-se que blocos contíguos sejam colhidos no mesmo período.

Segundo Murray (1999), em modelos tradicionais de adjacência, Modelo de Restrição por Unidade (URM), as unidades de gestão são formadas prioritariamente pelo planejador florestal. Para Crowe (2004), na abordagem ARM os limites de todos os blocos de colheita potenciais não são predefinidos. Os polígonos podem ser agregados para formar blocos de colheita durante a busca pela solução ótima. O limite dessa agregação é definido pela área máxima de colheita. Segundo o mesmo autor, uma das vantagens da formulação ARM é que os blocos de colheita emergem em um contexto de um fluxo ótimo da produção de madeira, ao contrário dos blocos pré-definidos da abordagem URM, em que dificulta a obtenção de um equilíbrio na produção.

Ambas as abordagens (URM e ARM) se baseiam na incorporação das restrições de adjacência ao modelo de planejamento otimizado e demandam a utilização de variáveis binárias, que são relacionadas a cada talhão. A incorporação destas variáveis binárias aumenta a complexidade do modelo de otimização, gerando problemas de Programação Linear Inteira (PLI) (AUGUSTYNCZIK, 2014).

2.7 MODELOS MATEMÁTICOS

Segundo Gomide (2009), a ideia do planejamento florestal levando em consideração o espaço, se mistura com a história inicial do Sistema de Informações Geográficas (SIG). O planejamento espacial identifica e expõe os componentes da paisagem, auxiliando a uma tomada de decisão mais consciente sobre os aspectos ecológicos do ecossistema. Nesse ponto, algumas restrições são introduzidas pelo modelo matemático para permitir essa ação. Como exemplo de restrições, têm-se: áreas de conexão entre fragmentos, distância entre blocos explorados, distribuição de estradas e outros itens importantes na redução de impactos ambientais.

Os modelos matemáticos têm sido utilizados com sucesso na tomada de decisões da floresta por várias décadas. As decisões suportadas por modelos vão desde aquelas estratégicas de longo alcance para programar os ciclos de colheita e o plantio com horizontes temporais de um século ou mais até as decisões operacionais diárias na colheita e no transporte (MARTELL et al., 1998).

2.7.1 Modelos de programação linear para o planejamento florestal

Os modelos matemáticos da programação linear usados na otimização da produção/investimento em um período de planejamento, baseiam-se em dois modelos genéricos, definidos como modelo tipo I e tipo II, publicado por Johnson e Scheuerman (1977). Esses modelos se distinguem dependendo da forma como as variáveis de decisão são definidas.

No modelo tipo I, uma atividade é representada por ações tomadas sobre as unidades de manejo durante o horizonte de planejamento. No modelo tipo II, uma atividade é representada por ações que atuam sobre talhões de uma classe de idade existente durante o horizonte de planejamento. A modelagem matemática desses dois tipos é apresentada sob a forma de uma função objetivo e restrições de área disponíveis em um determinado período (PEREIRA, 2007).

Segundos Johnson e Scheuerman (1977) o modelo tipo II demanda um menor esforço na formulação do problema, pois tem uma flexibilidade maior, entretanto a implementação de sua solução é mais trabalhosa, visto que as unidades de manejo não são constantes ao longo do horizonte de planejamento. No

modelo tipo I, a floresta é subdividida em classes homogêneas de idades, portanto as unidades de manejo são as mesmas dentro do horizonte planejado.

O Modelo tipo II permite que uma determinada área seja considerada mais de uma vez ao longo do horizonte de planejamento considerado. Consequentemente, novos talhões implantados durante o período de planejamento em questão são incorporados à otimização e ao resultado do modelo. Portanto, quanto maior o horizonte de planejamento, maior a importância de se levar em conta os novos talhões para as decisões de manejo. Nesse caso, o modelo de planejamento deve indicar as áreas a serem cortadas em função da sua idade, e não da sua localização geográfica. Este aspecto é crucial na hora de escolher o melhor modelo para formular o planejamento específico (SCHUCHOVSKI, 2003).

Segundo Pereira (2007) o modelo tipo I preserva intactas as áreas do início do planejamento, comportamento que não ocorre no modelo tipo II. Dessa forma, o modelo tipo I permite identificar com mais clareza a área manejada na floresta, o que justifica sua maior aplicabilidade.

Dentre os autores que utilizaram o modelo tipo I cita-se: Carnieri (1989) e Carnieri et al. (1991) utilizaram o modelo tipo I para desenvolver um sistema de planejamento florestal. Barros e Weintraub (1982) desenvolveram um sistema de planejamento para indústria florestal e Volpi (1997) verificou o impacto de perturbações estocásticas nos dados de um modelo de planejamento florestal.

O primeiro passo para implementação do modelo tipo I é a determinação do horizonte de planejamento e das possíveis rotações de corte. A rotação de corte é o período de tempo desde o estabelecimento do povoamento até o seu corte raso, sendo o horizonte de planejamento (HP) definido como a quantidade de anos no qual um projeto é realizado (LEUCHNER, 1990).

Rodrigues et al. (2006), com o uso do algoritmo *Branch and Bound* implementado no *software* LINDO versão 6.0 demonstrativa, trabalharam com os modelos tipo I e tipo II. Para garantir a integridade das unidades de manejo utilizando a formulação via modelo tipo II, estabeleceram restrições de natureza não-linear, resultando em problemas de programação não-linear inteira, os quais afirmaram que esses são de solução ainda mais complexa, pois sua solução esbarra na baixa eficiência dos principais algoritmos de solução exata.

Oliveira et al. (2002) aplicaram uma das técnicas de programação multi-objetivo (*goal programming*) em um problema florestal realizado na Fazenda Santa

Cândida, em General Carneiro, PR, em que as áreas podiam ser manejadas para corte de madeira (*Pinus* e de espécies nativas), corte de folhas de erva-mate para chá ou chimarrão, pastagens e turismo. Objetivaram também, aumentar a diversidade da flora e da fauna, incrementar as áreas de proteção ambiental e manter os empregos no empreendimento. Aplicaram *Goal Programming* para alocação de áreas da fazenda, atingindo as metas citadas o mais próximo possível do ideal. Deduziram que o modelo mostrou-se adequado para situações reais nas quais vários objetivos são almejados, demandando-se, porém, requisição de experiência do “planejador” na definição dos pesos atribuídos para priorizar o almejado pela administração da fazenda.

2.7.2 Programação linear inteira

A programação linear é uma poderosa ferramenta de planejamento e vem sendo largamente utilizada em todo o mundo. No setor florestal, seu uso tem-se difundido bastante, principalmente nos países desenvolvidos (MARTINI; BARBOSA, 1988).

O uso de técnicas de programação linear inteira ou programação linear inteira mista surgiu com a necessidade de se incorporar aos modelos, variáveis cujos valores não podem ser divididos. Para as situações onde se utilizam apenas variáveis lineares inteiras, tem-se um problema de programação inteira. Já caso sejam utilizadas em um mesmo problema variáveis lineares inteiras e contínuas, então, tem-se um problema de programação inteira mista. Dentro do conjunto de variáveis inteiras, existem variáveis classificadas como binárias, as quais são amplamente utilizadas nos problemas de planejamento florestal (BUONGIORNO; GILLES, 2003).

Os principais exemplos de aplicações deste tipo de problema são utilizados para representar o planejamento florestal tático, com a incorporação de restrições espaciais, de seleção de equipes e sistemas de colheita ou mesmo os locais de construção de estradas (BETTINGER; SESSIONS, 2003).

Alguns modelos utilizam variáveis que devem ser inteiras, como por exemplo, não é possível construir 12,53 carros. Assim, os modelos de PL onde todas as variáveis devem possuir valores inteiros, são denominados modelos de programação linear inteira (PLI) e os modelos de programação linear com variáveis

inteiras e variáveis contínuas são denominados modelos de programação linear inteira mista (PLIM). Existem ainda modelos PLI que possuem as variáveis inteiras restritas aos valores zero ou um (SALKIN, 1975). A PLI amplia enormemente a variedade de situações em que modelos de PL podem ser aplicados como, por exemplo, orçamento de capital, modelos de localização, de economia de escala, decisões do tipo sim ou não e outros (PEREIRA, 2007).

Conforme Pereira (2007) pode-se pensar que um problema de programação inteira é mais simples que um de programação linear. A realidade é outra. Um bom programa de computador resolve, em poucos minutos, um problema de programação linear com milhares de variáveis e de restrições, ao passo que um problema de programação inteira, com algumas centenas de variáveis pode não ser resolvido de maneira aceitável por um tempo computacional relativamente grande. A programação inteira amplia a variedade de situações e de problemas abordáveis pela programação linear.

De acordo com Deusen (2001) restrições relacionadas ao tamanho da área de corte raso em uma floresta são conceituadas como restrições de adjacência na literatura e muitos algoritmos foram desenvolvidos para resolver este tipo de problema, utilizando a programação linear inteira e inteira mista.

2.7.3 Técnicas para resolução de PPLI

Entre as técnicas de resolução de um problema de programação inteira, pode-se citar os métodos exatos e os heurísticos. Quando é necessário optar entre o uso de métodos exatos ou heurísticos tem-se um dilema entre eficiência e eficácia. A eficiência significa resolver um problema, encontrando uma solução ótima sem se preocupar com o tempo que isso leva. Já a eficácia significa resolver um problema, isto é, encontrar uma solução, não necessariamente a melhor, dentro de um tempo razoável. O tempo pode ser uma restrição na busca de uma solução (ANDRADE, 2002).

A heurística é uma técnica que melhora a eficácia de um processo de busca, possivelmente, sacrificando a obtenção da solução ótima. Ela é como um guia de turismo. É válida no sentido que aponta para direções geralmente interessantes; e é imprópria no sentido de que deixa de fora pontos de interesse para determinados

indivíduos. Usando-se uma boa heurística, pode-se esperar obter boas soluções para problemas difíceis (LOESCH; HEIN, 1999).

O principal objetivo de uma abordagem heurística é para ser capaz de incorporar os aspectos necessários do problema de planejamento, bem como ser capaz de fornecer soluções viáveis. A fim de serem bem-sucedidas, as abordagens de soluções heurísticas devem também exigir menos recursos do computador, em termos de requisitos de armazenamento e os tempos de processamento, e ser capaz de produzir soluções próximas de ótimas ou de alta qualidade. Diante disso, soluções com abordagens heurísticas podem ser ideais para a geração de uma gama de alternativas de solução. Isso é típico da necessidade na maioria dos ambientes de tomada de decisão, uma vez que uma solução "ótima" pode não ser aceitável para a empresa (MURRAY; CHURCH 1995).

Podem-se citar, como exemplo dessas aplicações, os trabalhos de Boston e Betingler (2002), utilizando técnicas heurísticas de busca Tabu e algoritmo genético. Murray e Church (1995), Crowe e Nelson (2003) estudaram a heurística *simulated annealing* (recozimento simulado). Destacam-se também os estudos realizados por O'Hara et al. (1989), Nelson e Brodie (1990) ao utilizar o método heurístico denominado Simulação de Monte Carlo.

Dentre os métodos exatos utilizados para resolver problemas de programação inteira pode-se citar o método *Branch and Bound*. O método que pode ser traduzido como "ramifique e delimite" exige o uso do método simplex e pode resolver problemas de programação linear inteira e mista. Primeiro é alcançada uma solução ótima não inteira e em seguida efetuam-se partições no espaço das soluções e conclui-se a "otimalidade" da solução, usando limites calculados ao longo da enumeração das soluções (ZIONTS, 1974).

O algoritmo *Branch and Bound* também pode ser utilizado para encontrar soluções próximas da ótima e, além disso, fornece um limite máximo na diferença (valor tolerância) entre o valor da função objetivo da melhor solução factível inteira e o valor da função objetivo da solução ótima. Com isso, o algoritmo, pode ser programado para parar quando o valor de tolerância atingir algum nível aceitável, como 1% ou 2% (MCDILL; BRAZE, 2001).

O princípio do *Branch and Bound* é a enumeração de todas as soluções viáveis de um problema de otimização. Um ramo da árvore de enumeração define

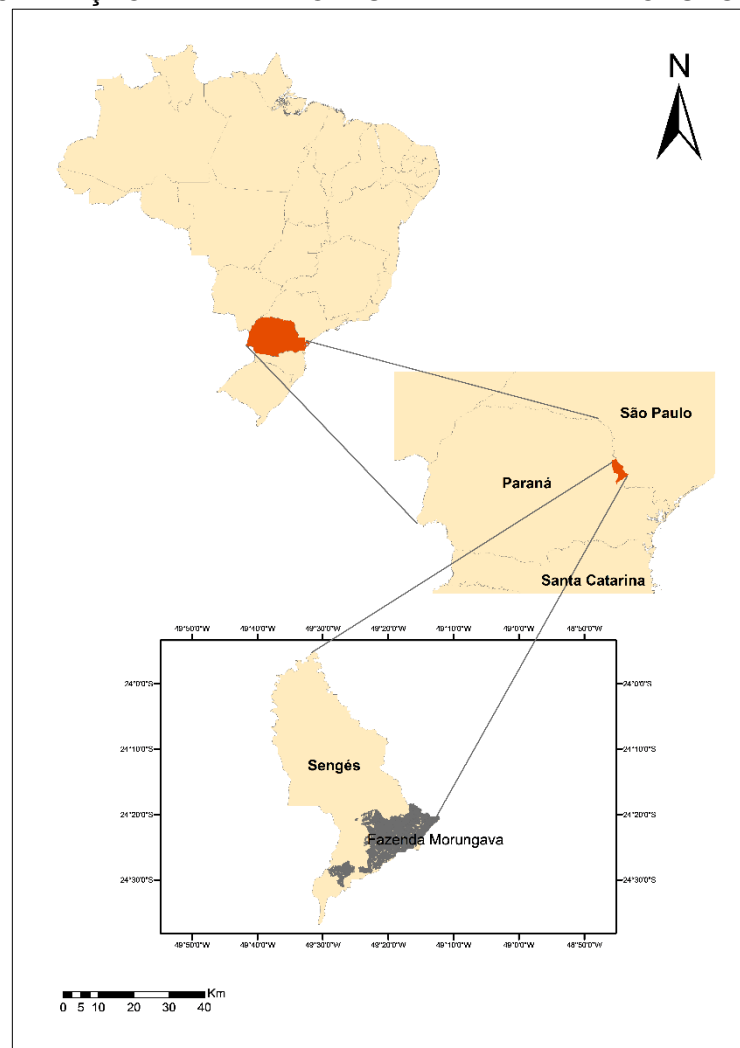
um subconjunto do conjunto de todas as soluções viáveis do problema original onde cada elemento do subconjunto satisfaz esse ramo (ALONSO, 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido em uma fazenda pertencente à empresa Arauco Forest Brasil S.A. localizada no município de Sengés, região nordeste do estado do Paraná. O clima na região, de acordo com a classificação climática de Köeppen, é o Cfb, ou seja, clima temperado, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico) e geadas; com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo.

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA FLORESTAL DA FAZENDA MORUNGAVA EM SENGÉS



FONTE: O autor (2016).

3.2 ESPECIFICAÇÃO DOS DADOS

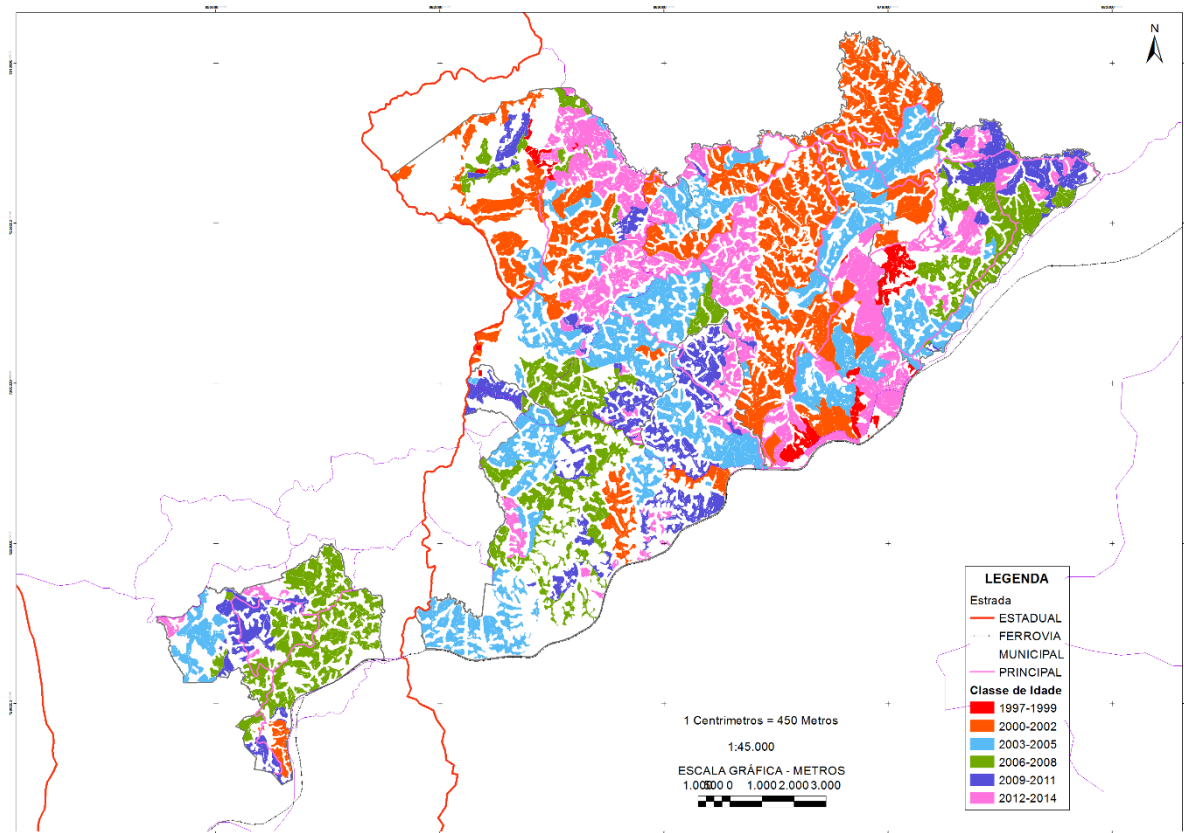
No Quadro 1 é apresentado o uso do solo consolidado das áreas florestais certificadas.

QUADRO 1 - RESUMO (ÁREAS CERTIFICADAS) COM O USO GERAL DO SOLO

USO DO SOLO	ÁREA	
	Hectares	Percentual
Produtivas	13.510	60
Conservação (RL + APP)	8.741	37
Outros Usos	620	3
TOTAL	22.871	100

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial inicial das áreas florestais classificadas pela espécie e ano de plantio, juntamente com a malha viária da área de estudo. Estas informações foram obtidas por um banco de dados de SIG.

FIGURA 2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE SENGÉS



FONTE: O autor (2015).

A área é composta por 1.832 talhões, sendo 9 talhões da espécie *Eucalyptus* spp., 5 talhões de *Pinus* spp. e 1.818 talhões de *Pinus taeda*, com uma área de aproximadamente 13.510 ha de floresta de produção e 22.871 ha de área total. A área média dos talhões é de 7,25 ha e o número médio de adjacências por talhão é de 4. A Tabela 1 apresenta as distribuições da área de colheita da floresta por classe de idade, considerando a frequência dos talhões de *Pinus* e *Eucalyptus*.

TABELA 1 - ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA

Classes de idade (anos)	Área		Talhões	
	(ha)	(%)	Frequência	(%)
[0 a 5)	2.833	21,43	504	27,51
[5 a 10)	3.407	25,78	583	31,82
[10 a 15)	5.815	43,99	604	32,97
[15 a 20)	1.148	8,68	130	7,10
[20 a 25)	2	0,01	2	0,11
> 25	14	0,11	9	0,49
Total	13.219	100	1.832	100

FONTE: O autor (2015).

A empresa possui a prognose de crescimento das suas florestas, tendo a seu dispor os dados de produção de madeira de cada produto disponíveis em cada talhão e período.

A obtenção dos volumes anuais por sortimento em cada unidade de manejo foi realizada a partir de produção (Tabela 2) fornecida pela empresa considerando um índice de sítio 23 m na idade de referência de 15 anos.

TABELA 2 - TABELA DE PRODUÇÃO POR ÍNDICE DE SÍTIO PARA *Pinus taeda* (m³/ha)

Idade (anos)	Sítio (m)				
	19	21	23	25	27
5	63,0	75,2	87,4	99,7	111,9
6	92,0	109,9	127,8	145,6	163,5
7	125,2	149,5	173,9	198,2	222,6
8	161,5	192,9	224,3	255,7	287,1
9	199,6	238,4	277,2	316,0	354,8
10	238,2	284,5	330,9	377,2	423,5
11	276,2	329,9	383,6	437,3	491,0
12	312,4	373,1	433,9	494,6	555,4
13	345,9	413,2	480,5	547,7	615,0
14	376,2	449,4	522,5	595,7	668,8
15	402,8	481,1	559,5	637,8	716,1
16	425,6	508,3	591,1	673,8	756,6
17	444,6	531,0	617,4	703,9	790,3
18	460,0	549,5	638,9	728,4	817,8
19	472,3	564,1	655,9	747,8	839,6
20	481,8	575,4	669,1	762,8	856,5

FONTE: Dados fornecidos pela empresa.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos do incremento médio anual volumétrico (IMA) que representa o crescimento médio em volume da floresta até a determinada idade. Pode-se perceber que no sítio de 23m, de interesse neste estudo, o IMA começa a decrescer a partir dos 15 anos.

TABELA 3 - VALORES DE IMA (m³/ha/ano) POR ÍNDICE DE SÍTIO PARA *Pinus taeda*

Idade (anos)	Sítio (m)				
	19	21	23	25	27
5	12,6	15,0	17,5	19,9	22,4
6	15,3	18,3	21,3	24,3	27,3
7	17,9	21,4	24,8	28,3	31,8
8	20,2	24,1	28,0	32,0	35,9
9	22,2	26,5	30,8	35,1	39,4
10	23,8	28,5	33,1	37,7	42,4
11	25,1	30,0	34,9	39,8	44,6
12	26,0	31,1	36,2	41,2	46,3
13	26,6	31,8	37,0	42,1	47,3
14	26,9	32,1	37,3	42,6	47,8
15	26,9	32,1	37,3	42,5	47,7
16	26,6	31,8	36,9	42,1	47,3
17	26,2	31,2	36,3	41,4	46,5
18	25,6	30,5	35,5	40,5	45,4
19	24,9	29,7	34,5	39,4	44,2
20	24,1	28,8	33,5	38,1	42,8

FONTE: O autor (2015).

O manejo desta área é certificado desde 2003 por atender aos Princípios e Critérios do FSC® (*Forest Stewardship Council*®). O FSC é uma das mais importantes certificações socioambientais no mundo e seu objetivo é garantir que esse manejo está sendo conduzido de modo ambientalmente adequado, socialmente justo e economicamente viável.

O objetivo do manejo florestal da empresa é fornecer matéria-prima de qualidade para suas unidades industriais e atender a demanda de mercado, de forma competitiva, garantindo a sustentabilidade do negócio florestal, valorizando os serviços ambientais e sociais da floresta através das melhores técnicas existentes e aplicáveis.

3.3 GERAÇÃO DOS BLOCOS DE COLHEITA

Para evitar que talhões muito distantes um do outro, ou de difícil acesso, fossem selecionados para corte em um mesmo período, o que aumentaria muito o custo de produção, optou-se por gerar blocos de colheita, objetivando a redução da movimentação do maquinário entre os talhões e evitando a ocorrência de talhões isolados no planejamento da colheita.

Foram considerados algumas premissas na formação dos blocos, entre elas a presença da rede de estradas, assim como a rede hidrográfica, as áreas de preservação e as próprias unidades de manejo. A inclusão dessas premissas garantiu a formação *a priori* de blocos contínuos e acessíveis, por não haver impedimento interno de deslocamento da frente de corte e de transporte de madeira.

Os blocos foram compostos por talhões com idades de 13 a 17 anos, dentro de um horizonte de planejamento de 5 anos. Para garantir que os blocos contenham os mesmos dados da cobertura florestal original (área e idade), essas camadas foram combinadas por meio do sistema de informação geográfica (SIG) no programa ArcGIS. Assim, cada talhão pertence a um bloco geográfico.

A distância real rodoviária entre todos os pares de blocos foi mensurada com o auxílio do SIG. Foram consideradas as respectivas bifurcações da estrada principal com a estrada secundária, para onde a madeira é baldeada, como sendo os pontos de origem e término do trajeto, permitindo a construção de uma matriz de distâncias de estrada principal entre blocos.

Em geral, o problema consistiu da determinação da agenda de colheita com não mais que 350 ha contíguos de floresta sejam colhidos no mesmo período de tempo. Em termos de notação, isso é equivalente a colher em cada período de tempo apenas grupos compatíveis de blocos viáveis.

3.4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O enfoque principal deste trabalho foi efetuar o agendamento da colheita de forma a minimizar a distância média de transporte de madeira respeitando as demandas dos produtos para cada ano e as alternativas de manejo estabelecidas inicialmente. O cenário deve atender a demanda de três multiprodutos, classificados como processo, serraria 1 e serraria 2. O diâmetro na ponta fina com casca, geralmente utilizado, é de 8 cm para madeira para processo, 18 cm para serraria 1 e acima de 25 cm para serraria 2. A classificação dos sortimentos é apresentada na Tabela 4.

TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS SORTIMENTOS

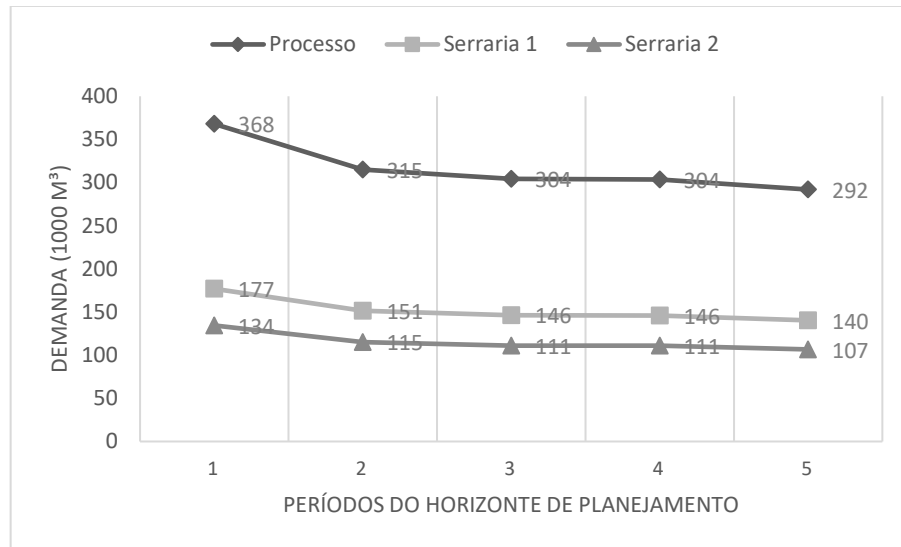
Descrição	Diâmetro (cm)	Comprimento (m)	% do volume total
Resíduo	0 a 8	2,4	4
Processo	8 a 18	2,65	52
Serraria 1	18 a 25	2,65	25
Serraria 2	> 25	2,65	19

FONTE: O autor (2015).

O horizonte de planejamento estudado foi de 5 anos e as projeções de crescimento volumétrico da floresta seguiram os dados da própria empresa, tendo ao seu dispor os dados de volumes de madeira para cada produto disponíveis em cada talhão e em cada período.

A definição da meta de produção volumétrica anual foi proposta em relação a demanda para cada classe de sortimento obtida com o planejamento testemunha. A Figura 3 mostra o gráfico com a demanda volumétrica anual por classe de sortimento. Com base nos resultados de um plano tático de colheita fornecido pela empresa, correspondente ao período de 2015 a 2019, foram determinadas as metas de produção anuais para a área de estudo, em m³ por produto.

FIGURA 3 - DEMANDA VOLUMÉTRICA EM MILHARES DE M³ POR CLASSE DE SORTIMENTO POR PERÍODO



FONTE: O autor (2015).

A Tabela 5 apresenta as metas de produção resultantes do plano tático fornecido para a área de estudo, para os cinco períodos anuais considerados e para os três diferentes produtos.

TABELA 5 - DEMANDA ANUAL DE PRODUÇÃO POR PERÍODO E PRODUTOS CONSIDERADOS

Período	Demanda (1000 m ³)			
	Processo	Serraria 1	Serraria 2	Total
1	368	177	134	679
2	315	151	115	581
3	304	146	111	562
4	304	146	111	561
5	292	140	107	539

FONTE: O autor (2015).

3.5 MODELO PROPOSTO

Para a realização deste estudo, o problema foi representado por um modelo conforme a estrutura da programação linear inteira (PLI), seguindo a formulação do modelo tipo I de Johnson e Scheuerman (1977), para o sequenciamento anual das operações de colheita dos blocos selecionados para corte raso no planejamento tático. A configuração do problema de colheita abordado requer o uso de variáveis binárias para as decisões do tipo sim ou não. Os índices utilizados no modelo foram:

i = número do bloco a ser colhido, sendo $i = 1, \dots, 38$;

j = período anual de planejamento, sendo $j = 1, \dots, 5$;

p = número do multiproduto ou sortimento, sendo $p = 1,2,3$;

N_b = número total de blocos;

N_p = número total de anos do horizonte de planejamento;

v_{ijp} = volume total (m^3) do produto p existente no bloco i no ano j ;

K_{pj} = demanda requerida do produto p no ano j ;

$D_{i_1i_2}$ = distância (m) entre os blocos i_1 e i_2 ;

X_{ij} = variável binária: 1, caso o bloco i seja colhido no ano j ; 0, caso contrário;

$Y_{i_1i_2j}$ = variável binária: 1, caso o trecho de estrada entre o par de blocos $i = 1$ e $i = 2$ seja usado no ano j ; 0, caso contrário.

3.5.1 Função Objetivo

O modelo de otimização formulado possui a função objetivo de minimização da distância total de estradas principais utilizadas para o escoamento da produção madeireira. Objetiva-se com esse modelo solucionar o problema relacionado ao espalhamento de colheita, a fim de diminuir custos de deslocamento de funcionários, maquinário e outros. Esta distância total é obtida por meio do somatório das distâncias entre os pares de blocos que serão colhidos em determinado ano.

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i_1}^{N_b} \sum_{i_2 \neq i_1}^{N_b} \sum_{j=1}^{N_p} (Y_{i_1i_2j} * D_{i_1i_2}) \quad (1)$$

3.5.2 Restrições

A seguir é realizada a descrição detalhada de cada restrição utilizada:

a) Restrições de Demanda

Para cada um dos produtos: processo, serraria 1 e serraria 2, a empresa deve suprir a demanda requerida pelos seus clientes. Sendo assim, para cada ano, cada um dos produtos deve atender uma demanda estabelecida. A restrição que assegura o suprimento dos três produtos é representada da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^{Nb} X_{ij} V_{ijp} \geq K_{pj} \quad \forall j, \forall p \quad (2)$$

b) Restrições de Corte

Essa restrição assegura que cada bloco seja colhido, em sua totalidade, no máximo uma única vez durante o horizonte de planejamento. Define as variáveis de decisão na forma binária, o que obriga a escolha de uma única variável de decisão (alternativa de manejo) em cada unidade de produção.

$$\sum_{j=1}^{Np} X_{ij} \leq 1 \quad \forall i \quad (3)$$

c) Restrições de Distância

Essa restrição permite a combinação de colheita dos pares de blocos com a distância do trecho de estrada entre eles.

$$X_{i_1j} - Y_{i_1i_2j} \leq 0 \quad (4)$$

$$X_{i_2j} - Y_{i_1i_2j} \leq 0 \quad (5)$$

A expressão (6) garante que as variáveis X_{ij} e $Y_{i_1i_2j}$ assumam apenas valores binários.

$$X_{ij}, Y_{i_1i_2j} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j \quad (6)$$

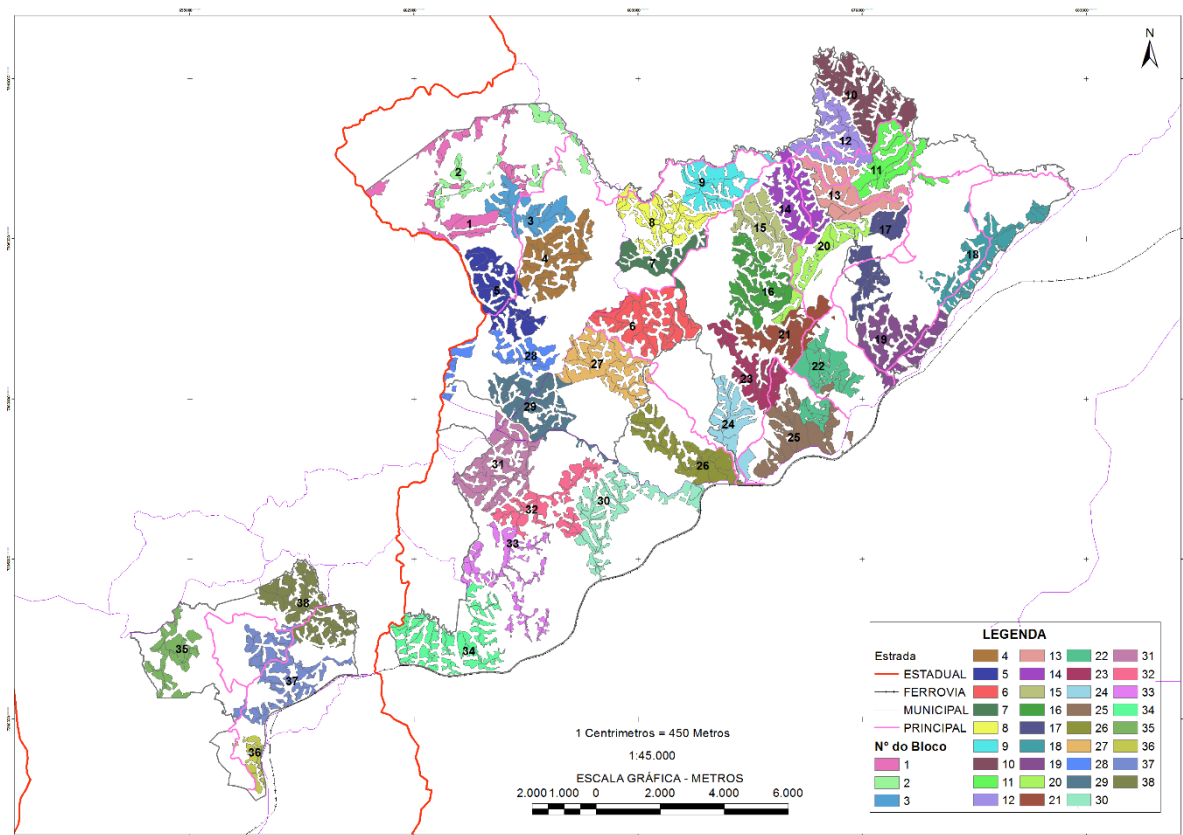
3.6 HARDWARE E SOFTWARE UTILIZADOS

O modelo matemático de PLI (programação linear inteira) foi construído em ambiente de planilha eletrônica Microsoft Excel 2013 e foi resolvido por meio do *software* de otimização IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.1 com licença IBM Academic Initiative. O processamento dos dados foi realizado em um microcomputador com processador Intel Core i7 2Ghz com 12 GB de memória RAM e 1 TB de HD. As distâncias, matrizes e os mapas foram gerados pelo programa ArcGIS versão 10.3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do mapa com as informações geográficas fornecidas pela empresa foram criados 38 blocos com talhões adjacentes e idades variando entre 13 e 17 anos, respeitando o limite máximo de área contígua de 350 ha. A Figura 4 apresenta blocos de colheita e estradas utilizadas no transporte da produção florestal da área de estudo.

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E IDENTIFICAÇÃO DOS BLOCOS



FONTE: O Autor (2016).

A área a ser colhida foi agrupada em blocos com áreas variando entre 100 e 350 ha. Assim, se um talhão tem área de 20 ha, por exemplo, ele é somado aos vizinhos (adjacentes) até que alcance uma área próxima aos limites desejados.

Na geração dos blocos, a adoção de idades máximas e mínimas de corte possibilitou cumprir as exigências da empresa, excluindo os talhões jovens com baixo estoque de madeira da colheita. O conceito de idade mínima de corte é comumente utilizado no planejamento espacial florestal, conforme Nelson (2001) e Binoti (2010).

Com a heterogeneidade da área e estoque de talhões antigos, a formação de blocos se torna restritiva, podendo ser necessária a colheita de talhões em idades fora da classe usual.

O problema consisti em agrupar talhões em blocos contíguos, de tal modo a permanecer uma faixa de vegetação entre eles. Essa característica está relacionada a casos em que há uma necessidade de ter corredores de árvores adultas entre clareiras resultantes da colheita, onde animais selvagens possam se alimentar. O papel dos corredores ecológicos é fornecer aos animais proteção para passar de uma clareira para a outra (SESSIONS e SESSIONS,1991).

As distâncias rodoviárias entre cada par de blocos obtidas com o auxílio do sistema de informação geográfica foram representadas na forma de uma matriz, a qual é apresentada de maneira resumida na Tabela 6. Essas distâncias foram utilizadas para formulação da função objetivo.

TABELA 6 - REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ BxB (DISTÂNCIA EM KM) PARA OS 10 PRIMEIROS BLOCOS

Bloco/Bloco	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	0,7	0,9	5,1	1,6	13,2	15,8	14,3	18,3	26,5
2	0,7	–	1,4	6,0	7,6	6,3	4,7	2,3	6,3	14,4
3	0,9	1,4	–	1,4	3,1	12,0	10,3	7,9	11,9	20,0
4	5,1	6,0	1,4	–	3,1	13,4	11,7	9,4	11,9	21,5
5	1,6	7,6	3,1	3,1	–	11,8	13,4	11,0	15,0	23,1
6	13,2	6,3	12,0	13,4	11,8	–	0,5	3,2	4,2	11,2
7	15,8	4,7	10,3	11,7	13,4	0,5	–	1,9	2,5	9,6
8	14,3	2,3	7,9	9,4	11,0	3,2	1,9	–	0,6	7,7
9	18,3	6,3	11,9	11,9	15,0	4,2	2,5	0,6	–	6,8
10	26,5	14,4	20,0	21,5	23,1	11,2	9,6	7,7	6,8	–

FONTE: O Autor (2016).

A formulação do modelo de planejamento resultou em um modelo com 7.410 variáveis de decisão binárias. As formulações das restrições resultaram em 14.494 restrições, das quais 38 são restrições de corte, 15 são restrições de demanda e 14.440 são restrições de distância para relacionar a colheita dos pares de bloco com a estrada principal que os ligam.

Depois de mais de 9 horas de processamento, o software CPLEX não conseguiu encontrar uma solução ótima, o que levou a fazer algumas modificações no modelo para tornar mais rápida a resolução.

O modelo foi desmembrado em cinco com a intenção de minimizar a distância total de transporte da função objetivo considerando um ano de cada vez,

começando pelo ano 1. Do ano 2 em diante foram acrescentadas ao modelo restrições de modo a manter inalteradas as soluções ótimas nos anos anteriores.

Desta maneira, cada bloco selecionado pelo modelo para ser colhido no ano 1 tornou-se uma restrição para o modelo do ano 2 e assim sucessivamente. A escolha da solução ótima para cada ano é feita com prioridade decrescente ao longo do horizonte de planejamento.

Com o desmembramento do modelo principal em 5 modelos anuais, o tempo de resolução foi expressivamente reduzido, variando de 0,25 a 1,5 segundos, como pode ser visto na Tabela 7. Também são mostrados na Tabela 7 a quantidade de iterações e o GAP que representa a diferença percentual entre o valor ótimo obtido e o *best bound*.

O próprio programa CPLEX mostra o valor do GAP e indica o erro relativo percentual da melhor solução viável encontrada e do melhor limitante inferior obtido pelo algoritmo dentro do intervalo de tempo. Caso o GAP for igual a 0,0%, significa que foi encontrada a solução ótima para o problema (FERNANDES et al., 2011).

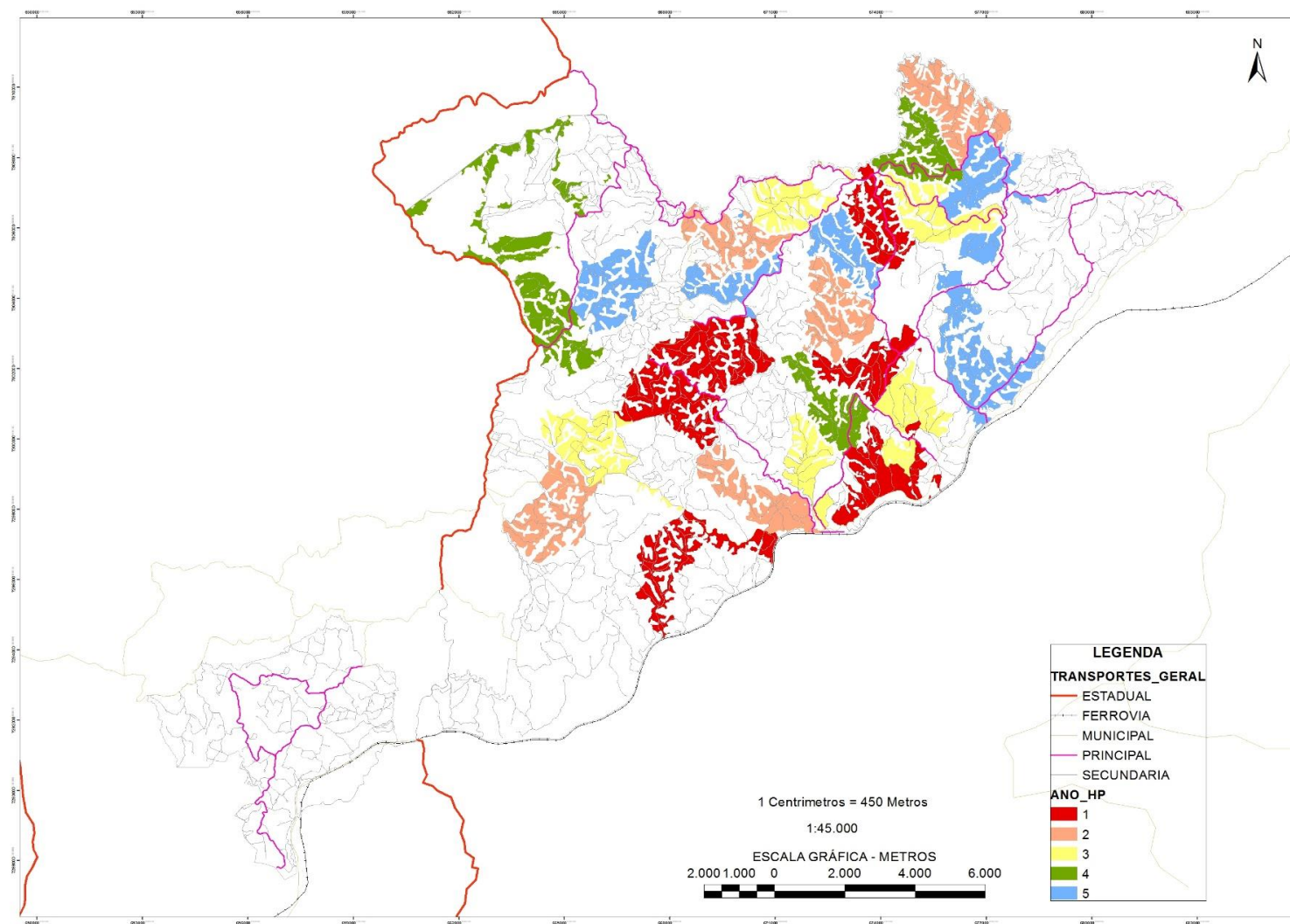
TABELA 7 - RESUMO DOS RESULTADOS PELO SOFTWARE CPLEX

Ano	Iterações	Tempo de solução (s)	GAP (%)
1	11.066	1,09	1,93
2	28.296	1,50	1,16
3	8.784	0,56	3,28
4	3.986	0,36	0,34
5	870	0,25	0,00

FONTE: O autor (2016).

Os resultados da otimização são apresentados sob a forma de um mapa mostrando a distribuição espacial das unidades de colheita nos 5 anos do HP. A Figura 5 apresenta o cenário de colheita após ter sido otimizado o modelo final para cada ano do horizonte de planejamento de 5 anos.

FIGURA 5 - AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA PARA OS 5 ANOS DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO



FONTE: O Autor (2016).

Conforme mostrado na Figura 5, a disposição dos blocos selecionados para colheita é considerada satisfatória, tanto pela proximidade às estradas bem como entre os blocos, expressando a relação das estradas de acesso a cada um dos blocos de colheita.

A formulação apresentada, apesar de não garantir a adjacência das áreas de colheita, apresentou respostas de boa qualidade, mostrando-se uma alternativa viável para a inclusão de questões espaciais e operacionais ligadas à colheita florestal, considerando que essa disposição dos blocos atende aos requisitos das áreas estarem com idade ideal para corte.

A solução apresentada na Figura 5 fornece os blocos que devem ser colhidos em cada ano, os quais juntamente com a área colhida, o volume total obtido e a distância total utilizada para colher o grupo de blocos, são apresentados na Tabela 8.

TABELA 8 - BLOCOS SELECIONADOS PARA CADA ANO DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO COM O TOTAL DA ÁREA

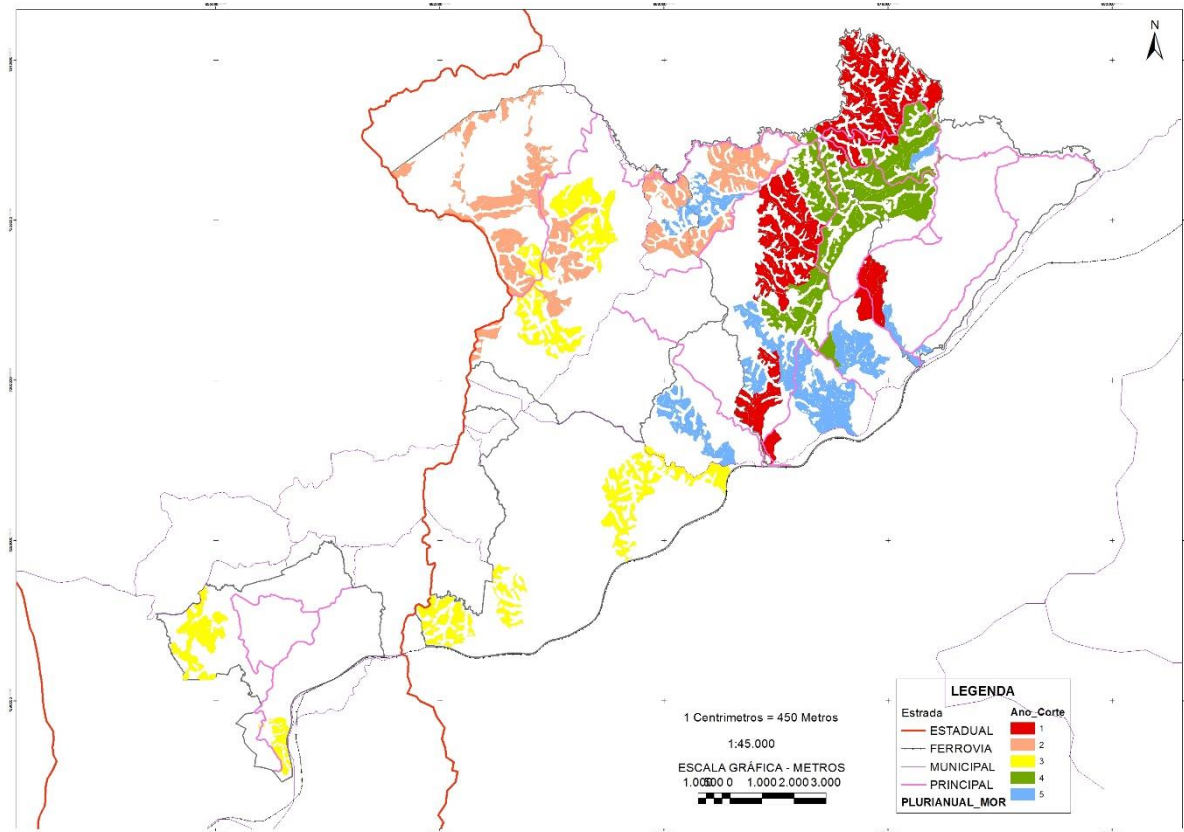
	Blocos selecionados				
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
	6	8	9	1	4
	14	10	13	5	11
	21	16	22	12	17
	25	26	24	23	19
	27	31	29	-	-
	30	-	-	-	-
Área (ha)	1.597,17	1.285,94	1.153,79	956,92	994,92
Volume (m³)	683.720,1	587.449,7	564.213,6	560.964,8	560.564,7
Estradas (km)	29,5	32,5	26,9	33,9	27,2

FONTE: O Autor (2016).

Em relação aos valores de área da Tabela 8, somando todos os anos do horizonte de planejamento seria colhida uma superfície de 5.989 ha, fornecendo um volume total de 2.956.912,9 m³ e a média de 30 km de estradas por ano.

Os resultados obtidos com a metodologia empregada foram comparados com os dados testemunha da mesma área de estudo fornecidos pela empresa, resultantes de um planejamento tradicional de colheita em que as unidades de manejo são os talhões, sem considerar a proximidade entre eles e a faixa de idade de 13 a 17 anos para colheita (Figura 6).

FIGURA 6 - PLANEJAMENTO ANUAL TESTEMUNHA

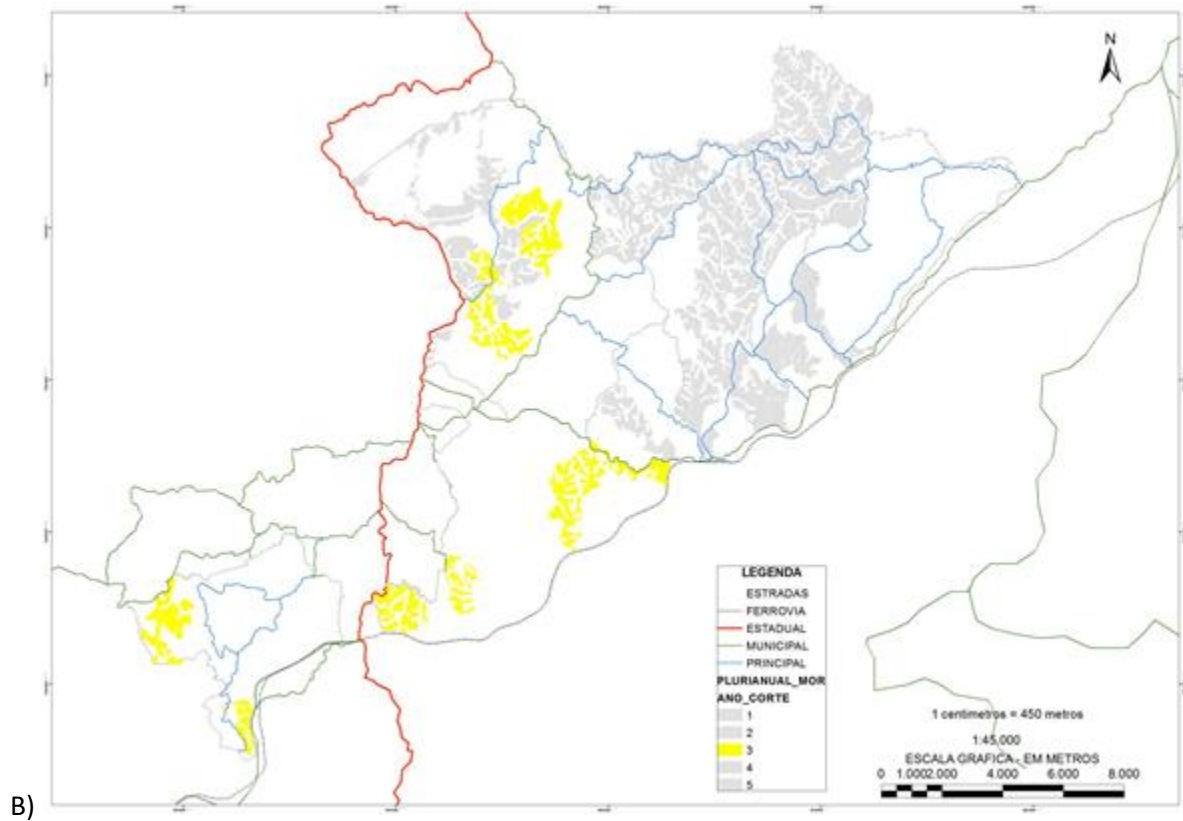
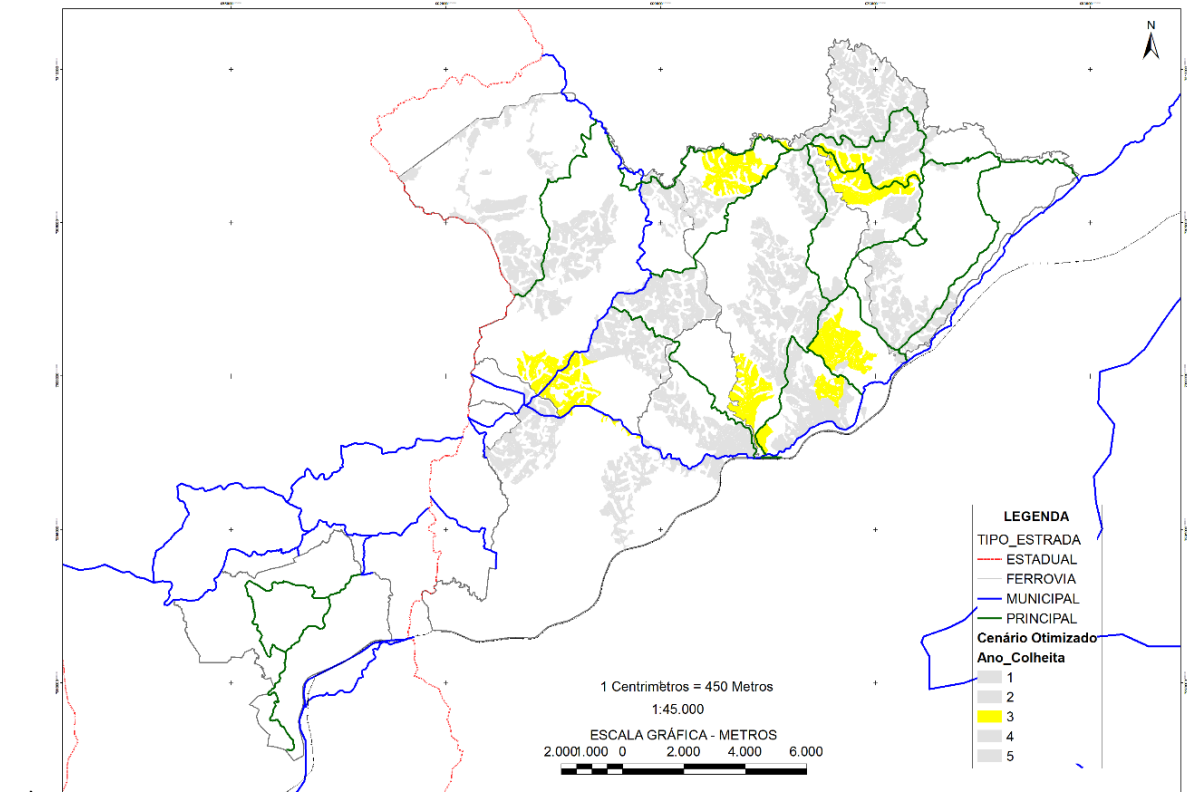


FONTE: O autor (2016).

Na Figura 6 foi observado um típico planejamento realizado de forma empírica, onde, para diminuir o deslocamento da frente de colheita, optou-se por colher talhões muito jovens, se comparado ao mapa da Figura 2, com as áreas classificadas por anos de plantio. Essa decisão pode resultar em baixo estoque de madeira de toras finas. É interessante observar que nos anos 1 e 4 a testemunha também mostrou bons resultados, mas deve-se ressaltar que isso ocorreu somente porque as idades dos talhões que são colhidos na testemunha foram de 10, 11 e 12 anos, ou seja, abaixo da idade mínima de 13 anos praticada pela empresa. Os modelos matemáticos conseguem eliminar esses talhões por meio das restrições impostas.

Também pode-se observar que nos anos 2, 3 e 5 a testemunha, mesmo colhendo em idades mais jovens, ainda foi superada pelo cenário otimizado. A área total que seria colhida nos 5 anos do horizonte de planejamento seria de 5.496,8 ha e o volume de 2.922.201,41 m³.

FIGURA 7 - MAPA DE COMPARAÇÃO PARA O TERCEIRO ANO DO HP. A) OTIMIZADO E B) TESTEMUNHA



FONTE: O autor (2016).

Na comparação do terceiro ano do horizonte de planejamento entre o cenário otimizado (A) e o cenário do planejamento testemunha (B) (Figura 7) percebe-se que a aproximação entre os blocos de colheita no cenário otimizado foi mais expressiva.

Além da área e do volume colhidos por blocos serem superiores ao planejamento tradicional, a maior vantagem da metodologia apresentada aqui foi a proximidade dos talhões selecionados para serem colhidos no mesmo período, agrupados em blocos, pois essa proximidade deverá reduzir os custos de transporte, manutenção de estradas e deslocamento de pessoal. Assim, as exigências da empresa foram cumpridas ao colher áreas mais concentradas e contíguas, com acesso por estradas principais e com as idades de corte ideais de 13 a 17 anos.

Segundo Augustinczik (2014) por meio da agregação das áreas de colheita florestal, é possível aumentar a eficiência dessa operação, devido à menor movimentação das máquinas entre as frentes de colheita, reduzindo o número de horas improdutivas. Adicionalmente, o custo de manutenção e de construção de estradas é reduzido, uma vez que a produção de um grande número de talhões pode ser escoada por uma mesma estrada. A economia de tempo de transporte, obtida pela proximidade às estradas, também traz redução considerável nos custos de operação.

Segundo Ohman e Eriksson (2010), outro efeito da agregação das áreas de colheita é a redução na aplicação de desbastes na floresta. Isso decorre do fato da aplicação do corte raso, uma vez que, com a agregação das áreas de colheita, é possível retirar um maior volume de áreas de colheita menores. O agrupamento de colheitas também pode ser motivado pela conservação da natureza, uma vez que a prática de dispersar talhões é um dos principais contribuintes para a fragmentação da floresta (WALLIN et al., 1994).

Os problemas de otimização da colheita florestal envolvendo estradas são complexos, em virtude do grande número de restrições na formulação dos modelos. Um bom exemplo foi demonstrado por Andalaft et al. (2002) que, ao considerar horizontes de 2 a 5 anos, formulou modelos de PLIM com mais de 6.000 restrições, relacionando as estradas na colheita florestal. O fato de realizar a formação dos blocos antes da construção do modelo diminui o número de restrições do modelo, bem como o esforço computacional.

Além disso, esse caso evidencia que se deve estar sempre à procura de representações alternativas de modelos e de problemas espaciais. Fazer isso pode ajudar a garantir uma melhor eficiência de gestão, bem como a viabilidade em longo prazo no uso de recursos naturais. Uma alternativa seria a empresa madeireira reduzir as metas de produção/volume de colheita, diminuindo assim o impacto regional total de atividades de colheita (MURRAY e WEINTRAUB, 2002).

A paisagem florestal é formada por um mosaico de unidades de manejo distintas que se interagem funcionalmente (TURNER, 1989). A interação entre as unidades de manejo decresce drasticamente com a distância (STRANGE et al., 2002). Neste estudo, foi apresentada uma alternativa para a inclusão das distâncias entre unidades de manejo em um modelo de planejamento florestal espacial.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A formação prévia de blocos de colheita dentro de uma faixa de idades de colheita e de um modelo de programação linear inteira, mostra-se eficaz no agendamento da colheita atendendo as exigências de produção impostas.

A flexibilização nas idades de colheita ocorre uma única vez por ocasião da conversão da estrutura atual de talhões, uma vez que, após a implementação do cenário otimizado, os blocos deverão perdurar ao longo do tempo considerando que as decisões de manejo sejam mantidas.

Os dados espaciais da floresta podem ser usados no planejamento florestal tático para a formação de blocos a partir de talhões adjacentes, de modo a produzir resultados semelhantes e até mesmo superiores aos normalmente obtidos pelos cenários tradicionais não espaciais de planejamento.

A utilização do *software* CPLEX com licença da IBM Academic Initiative para a resolução do problema mostra-se muito eficiente e de fácil manuseio e entendimento. Ressalta-se o fato de poder resolver, neste estudo, problemas com mais de um milhar de variáveis binárias em poucos segundos de processamento, por meio de hardware de custo relativamente baixo (Intel Core i7 2Ghz com 12 GB de memória RAM e 1 TB de HD). O *software* CPLEX é uma excelente ferramenta para resolução de problemas de forma rápida.

O modelo também pode ser construído em torno de diferentes restrições temporais e espaciais, tais como distâncias aos talhões e blocos vizinhos, número de períodos e duração dos períodos, custos e receitas, assim como topografia e relevo.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, L. R. L. **O Problema da consideração de restrições de adjacência em um planejamento florestal**. 114 f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos) – Setor de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- American Forest and Paper Association. 2001. **Sustainable forestry initiative standard**. Disponível em: <<http://www.afandpa.org/>> . Acesso em 25 mar. 2016.
- 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.
- ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional** – Métodos e modelos para a análise de decisão. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, 2002.
- AUGUSTO, R. C. **Aplicação da simulação computacional utilizando o software Arena para o estudo das filas nos caixas do supermercado Champion**. 2005. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BANHARA, J. R. **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático**. 2009. 166 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Piracicaba, 2009.
- BARROS, O.; WEINTRAUB, A. Planning for a vertically integrated forest industry. **Operations Research**, v. 30, n. 6, 1982.
- BASKENT, E. Z.; JORDAN, G. A. Spatial wood supply simulation modeling. **The Forestry Chronicle**, Canada, v.67, n. 6, p. 610-621, 1991.
- BASKENT, E. Z.; JORDAN, G. A. Characterizing spatial structure of forest landscapes. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 25, p. 1830–1849, 1995.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modeling**, v.188, p. 29, p. 145-176, 2005.
- BAUMANN, T. **Analyse logistischer Prozesse und deren Optimierungspotentiale entlang der Holzbereitstellungskette vom Wald zum Werk unterstützt durch spezielle Verfahren der Prozessmodellierung**: Durchgeführt am Beispiel verschiedener Forst- und Holzbetriebe in der Region Ostalb (Baden-Württemberg).

Dissertation an der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2009.

BETTINGER, P.; SESSIONS, J. Spatial forest planning: to adopt, or not to adopt? **Journal of Forestry**. v. 101, n. 2, p. 24–29, 2003.

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.

BOSTON, K.; BETTINGER, P. Combining tabu search and genetic algorithm heuristic techniques to solve spatial harvest scheduling problems. **Forest Science**, Bethesda: Society of American Foresters, v. 48, n. 1, p. 35-46, 2002.

BUONGIORNO, J.; GILLES, J. K. **Forest management and economics: a primer in quantitative methods**. New York: Collin Macmillan, 1987.

CARNIERI, C. **Planejamento florestal otimizado via redes de manejo**. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia de Sistemas, Universidade de Campinas, Campinas, 1989.

CARNIERI, C.; GAVINHO L. G.; MAESTRI, R. Um sistema de planejamento florestal. In: II Encontro de Planejamento florestal. EMBRAPA-CNPQ, **Anais...** Curitiba, 1991.

CHURCH, R.; MURRAY, A.; FIGUEROA, M.; BARBER, K. Support system development for forest ecosystem management. **European Journal Operational Research**, v. 121. p. 247–258. 2000.

CROWE, K. **Incorporating spacially splicit objectives into forest management planning**. Tese (Doutorado de Filosofia) – The University of British, Columbia, 2004.

CROWE, K. NELSON, J. An indirect search algorithm for harvest-scheduling under adjacency constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 49, n. 1, p. 1-11, 2003.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N.; BETTINGER, P.; HOWARD, T. E. **Forest Management: to Sustain Ecological, Economic, and Social Values**. McGraw-Hill Companies Inc, 2001.

DEUSEN, P. C. V. Scheduling Spatial Arrangement and Harvest Simultaneously. **Silva Fennica**. v. 35, n. 1, p. 85–92, 2001.

FERNANDES, D. R. M.; SILVA, A. F. da C.; ALOISE, D.; ROCHA, C. T. de M. **Heurísticas para otimização de um sistema multinível de transporte de carga**. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte, 2011.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 235f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

GUSTAFSON, E. J. Expanding the scale of forest management: allocating timber harvests in time and space. **Forest Ecology and Management**, p. 27-39, 1996.

GUNN, E. G. Some aspects of hierarchical production planning in forest management. In: **Proceedings** of the 1991 Symposium on Systems Analysis in Forest Resources, 3–6 March 1991, South Carolina, USDA FS General Technical Report SE-74, p. 54–62. 1991.

HOF, J. **Coactive forest management**. San Diego: Academic Press, 1993.

HOTVEDT, J. E. Application of linear goal programming to forest harvest scheduling. **Southern Journal of Agricultural Economics**, v. 15, p. 103-108, 1983.

JAMNICK, M. S.; WALTERS, K. R. Spatial and temporal allocation of stratum-based harvest schedules. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 23. p. 402-413, 1993.

JOHNSON, K. N.; SCHEUERMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives--discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 23, p. a0001-z0001, 1977.

KENT, B.; BARE, B.; FIELD, R.; BRADLE, G. Natural resource land management planning using large-scale linear programming: the USDA forest service experience with FORPLAN. **Operational Research**, v. 39, p. 13–27, 1991.

KURTTILA, M. The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning - a landscape ecological perspective. **Forest Ecology and Management**, Netherlands, v.142, n.2, p.129-142, 2001.

LEUSCHNER, W. A. **Forest regulation, harvest scheduling and planning techniques**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 281 p.

LISBOA, E. F. A. **Apostila do curso de pesquisa operacional**. Rio de Janeiro-RJ: 2002. 53 p. Disponível em <<http://www.ericolisboa.eng.br/>>. Acesso em: 27 ago. 2015.

LOESCH, C.; HEIN, N. **Pesquisa Operacional – fundamentos e modelos**. Blumenau: Editora FURB, 1999.

MAGRO, T. C. Manejo de paisagens em áreas florestadas. **Série Técnica IPEF**, v. 10, n. 29, p. 59 – 72, 1996.

MARTINI, E. L.; BARBOSA L. N. Planejamento Florestal: A importância e da aplicação da programação linear. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ECONOMIA FLORESTAL: 1. **Proceedings**, p. 544-74, 1988.

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

MCDILL, M. E.; BRAZE, J. Using the branch-and-bound algorithm to solve Forest planning problems with adjacency constraint. **Forest Science**, v. 47, n. 3, p. 403-418, 2001.

MCDILL, M.; REBAIN, S. A Mixed-Integer Formulation of the Minimum Patch Size Problem. **Forest Science**, v. 49, n. 4, p. 608-618, 2003.

MITCHELL, S. A. **Operational Forest Harvest Scheduling Optimisation** – A mathematical model and solution strategy. 252 f. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia) – University of Auckland, Auckland. 2004.

MURRAY, A. Spatial restrictions in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 45, n. 1, p.1 – 8, 1999.

MURRAY, A.; CHURCH, R. Heuristic solution approaches to operational Forest planning problems. **Operational Research Spektrum**, v. 17, p. 193 - 203, 1995.

MURRAY, A. T.; WEINTRAUB, A. **Scale and Unit Specification Influences in Harvest Scheduling with Maximum Area Restrictions**. *Forest Science*, v. 48, n. 4, 2002.

NAVON, D. I. **Timber RAM** ... a long-range planning method for commercial timber lands under multiple-use management. Berkeley: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. 1971.

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, J. D. Comparison of a random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest plans. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 20, p. 934-942, 1990.

O'HARA, A. J.; FAALAND, B. H.; BARE, B. B. Spatially constrained timber harvest scheduling. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 19, p. 715-724, 1989.

OHMAN, K. **Forest planning with consideration to spatial relationships**. 2001 Tese (Doutorado em Manejo de Recursos Florestais) – Swedish University of Agricultural Sciences, Umea. 2001.

OHMAN K., ERIKSSON L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, 2010.

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

PEREIRA, E. G. **Aplicação de modelos não lineares ao estudo de um problema florestal, atendendo a questões ambientais, operacionais e demandas do**

transporte de madeira. 2007.110 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PUCCINI, A. L.; PIZZOLATO, N. **Programação Linear.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, 1990.

ROCHA, D. X. **Otimização do planejamento da manutenção preventiva em sistemas complexos, com foco na cadeia de suprimento.** 2002. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2002.

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

RODRIGUEZ, L. C. E. **Planejamento agropecuário através de um modelo de programação linear não determinista.** Piracicaba, 1987. 83p. Dissertação (Mestrado em Economia Agrária) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

RODRIGUEZ, L. C. E.; BUENO, A. R. S.; RODRIGUES, F. Rotações de eucaliptos mais longas: análise volumétrica e econômica. **Scientia Forestalis,** Piracicaba, n. 51, p. 15-28, 1997.

SALKIN, H. M. **Integer programming.** Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1975.

SANTOS, A. L. dos. **Uso da programação linear na identificação de estratégias ótimas de regulação florestal considerando mix de consumo.** 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SCHUCHOVSKI, M. S. **Diagnóstico e planejamento do consumo de madeira e da produção em plantações florestais no estado do Paraná.** 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SEIXAS, F.; MAGRO, T. C. Indicadores ambientais e paisagísticos relacionados às operações florestais. **Série técnica IPEF,** v. 12, n. 31, p. 65-78, 1998.

SESSIONS, J.; BETTINGER, P. Hierarchical planning: pathway to the future? In: First international precision forestry cooperative symposium. **USDA Forest Service,** p. 185-190, 2001.

SESSIONS, J.; SESSIONS, J.B. **Scheduling and network analysis program.** User's guide. Department of Forest Management. Oregon State University, Corvallis, OR, 1991.

SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, G. Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimized harvest scheduling. **Forest Science**, v. 69, p. 651-657, 2012.

SNYDER, S.; REVELLE, C. Temporal and spatial harvesting of irregular systems of parcels. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 26, p. 1079–1088, 1996.

STRANGE, N.; MEILBY, H.; THORSEN, J. T. Optimizing land use in afforestation areas using evolutionary self-organization. **Forest Science**, v. 48, p. 543-555, 2002.

TURNER, M. G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 20, p.171–197, 1989.

VAN RAFFE, J. K. Tactic: a decision support system for forest management planning. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 27, p. 413–415, 2000.

VIELMA, J. P.; MURRAY, A. T.; RYAN, D.; WEINTRAUB, A. improving computational capabilities for addressing volume constraints in forest harvest scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 176, p. 1246-1264, 2007.

VOLPI, N. M. P. **O impacto de perturbações estocásticas em um modelo de planejamento florestal**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 1997.

WALLIN, D.O.; SWANSON, F.J; MARKS, B. Landscape pattern response to changes in pattern generation rules: land-use legacies in forestry. **Ecological Applications** 4(3): 569–580. 1994.

WALTERS, K. R. Defining adjacency and proximity of forest stands for harvest blocking. **GIS 96 Symposium**, Vancouver, fev. 1996.

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

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

WEINTRAUB, A.; NAVON, D. Forest management planning model integrating silvicultural and transportation activities. **Management Science**, v. 22, n. 12, p. 1299-1309, 1976.

ZHU, J.; BETTINGER, P.; LI, R. Additional insight into the performance of a new heuristic for solving spatially constrained forest planning problems. **Silva Fennica**, v.41, n. 4, p.687–698, 2007.

ZIONTS, S. **Linear and integer programming**. New Jersey: Prentice-Hall, 1974. 514 p.