



**ANDRÉ LUIZ RAIMUNDO FARIA**

**PROGRAMAÇÃO APLICADA AO  
MICROPLANEJAMENTO DA COLHEITA  
FLORESTAL EM PLANTIOS DE *Eucalyptus* sp.**

**LAVRAS – MG**

**2013**

**ANDRÉ LUIZ RAIMUNDO FARIA**

**PROGRAMAÇÃO APLICADA AO MICROPLANEJAMENTO DA  
COLHEITA FLORESTAL EM PLANTIOS DE *Eucalyptus* sp.**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Florestal, área de concentração em  
Manejo Florestal, para a obtenção do  
título de mestre.

Orientador

Dr. Lucas Rezende Gomide

**LAVRAS – MG**

**2013**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Faria, André Luiz Raimundo.

Programação aplicada ao microplanejamento da colheita florestal  
em plantios de *Eucalyptus* sp. / André Luiz Raimundo Faria. –  
Lavras : UFLA, 2013.

108 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Lucas Rezende Gomide.

Bibliografia.

1. Programação linear inteira. 2. Problema das P-Mediana. 3.  
Sistemas de Informação Geográfica. I. Universidade Federal de  
Lavras. II. Título.

CDD – 634.980113

**ANDRÉ LUIZ RAIMUNDO FARIA**

**PROGRAMAÇÃO APLICADA AO MICROPLANEJAMENTO DA  
COLHEITA FLORESTAL EM PLANTIOS DE *Eucalyptus* sp.**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Florestal, área de concentração em  
Manejo Florestal, para a obtenção do  
título de mestre.

APROVADA em 19 de março de 2013.

Dr. Júlio Eduardo Arce UFPR

Dr. Luis Marcelo Tavares de Carvalho UFLA

Dr. Lucas Rezende Gomide

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2013**

Aos meus pais, Angela e Advaldo,  
exemplos de dedicação, amor e trabalho.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por mais esta conquista, pela coragem e força para enfrentar os desafios que a vida impõe, pois, feliz é aquele que tem uma família presente e amada, amigos sinceros e verdadeiros e vontade e disposição para aprender e superar suas próprias limitações. Graças a Deus, eu me considero abençoado com estas graças.

Assim, gostaria de agradecer às pessoas mais importantes da minha vida, a minha família: meus pais, Angela e Advaldo, pelo amor e apoio incondicional e ao meu irmão, Carlos Henrique, pelo companheirismo de sempre, a minha eterna gratidão. Sem vocês nada disso seria concretizado e são vocês os responsáveis pela minha eterna vontade de crescer e vencer na vida.

Meus agradecimentos ao meu orientador de mestrado e peça fundamental nesta conquista, professor Lucas Rezende Gomide, pela paciência, orientação e ensinamentos ao longo desses dois anos.

Minha eterna gratidão ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e aos técnicos, professores e demais funcionários do Departamento de Engenharia Florestal da UFLA e também do Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal (LEMAF).

Meus agradecimentos À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa.

Gostaria de agradecer também à empresa Celulose Nipo-Brasileira – CENIBRA, pelo apoio e concessão da base de dados para a realização deste estudo. Em especial, aos engenheiros florestais, Bruno Ricardo Fernandes e Geraldo Magela Pereira Filho e também ao estagiário Edson Junior Costa Moreira.

Ao amigo André Lara, pelo companheirismo nas infinitas horas de trabalho na UFLA.

A Daniela da Sé, pela contribuição direta no desenvolvimento desse trabalho.

Meu eterno agradecimento aos amigos Célio, Marcela e Joyce, por toda a amizade, desde a época da graduação e pelas palavras de incentivo e consolo. Sem vocês meus dias de trabalho no LEMAF não teriam sido tão divertidos e inesquecíveis.

Aos demais amigos do LEMAF, Juliana, Tássia, Lisiane, Polyanne, Carol, Amanda (Amandinha), Iasmim, Paulo Henrique (Terra), Thiza, Beth, Glauca e Lívia. Meu eterno agradecimento.

Aos demais amigos do mestrado, Mariana, Fábio (Zebra), Ygoor, Gleisson, Amanda (Amandão) e Isaac. Obrigado pelos inúmeros momentos de diversão.

Aos meus amigos Matheus (Curu), Aline, Victor, Thaisa, Elias e Alvaro e todos os demais que, mesmo distantes, me deram um apoio muito especial nos momentos de dificuldade.

Aos meus companheiros de república durante esses dois anos, Celso Pedro (Verme), Baleta, Marcel (Tu), Thiago, Elliezer e Ernani, pelo convívio e apoio.

Enfim, a todos que acompanharam a minha jornada e que me apoiaram em todos os momentos, os meus sinceros agradecimentos.

*É um erro capital teorizar antes de ter dados.  
Inconscientemente, nós começamos a distorcer os fatos para  
se ajustarem às teorias, ao invés das teorias para se  
ajustarem aos fatos.*

**Sherlock Holmes**



## RESUMO

Este estudo foi realizado com o objetivo de estratificar espacialmente compartimentos de trabalho em plantios de *Eucalyptus* sp. localizados no estado de Minas Gerais, em idade de corte, usando programação linear inteira (PLI) e sistemas de informação geográfica (SIG), e visando minimizar o deslocamento de máquinas no interior dos talhões, auxiliando o microplanejamento da colheita florestal. Para isso dividiu-se a metodologia em duas etapas, sendo: pré-processamento da base de dados para a obtenção dos coeficientes dos modelos e modelagem matemática do problema. O pré-processamento da base de dados foi realizado em ambiente de SIG e constou na identificação de possíveis locais para empilhamento de madeira e subdivisão da área dos talhões em unidades de volume (UV) a serem empilhadas. Foram alocados pontos equidistantes em 1,5 m nas áreas aptas ao empilhamento (com inclinações inferiores a 27°) para a formação das unidades de pilha (UP). Os modelos avaliados foram as formulações clássicas da P-mediana e P-mediana capacitado, além de quatro variações desenvolvidas, totalizando seis modelos estudados. A função objetivo dos modelos visou minimizar o somatório das distâncias em linha reta (distância euclidiana) de extração da madeira contida em cada UV até as UPs. As variações dos modelos base continham restrições relacionadas ao controle volumétrico das UPs, por meio da adoção de limites de capacidade (variações 2 e 4) e agrupamento das mesmas (variações 1 e 3), forçando a seleção de UPs vizinhas por meio da imposição de penalidades. Os modelos foram processados fixando-se um tempo máximo de 2 horas, quando a solução final encontrada era avaliada. O algoritmo usado na resolução dos modelos foi o *Branch-and-bound*. Ao final da primeira fase, obtiveram-se 29 setores, totalizando 174 processamentos e 182,89 horas. Os modelos desenvolvidos apresentaram variáveis de decisão e restrições em excesso, tornando o processamento demorado. A estratégia de inclusão de limites volumétricos se apresentou mais consistente, frente à fixação prévia do número de UPs. O modelo mais eficaz para estratificar a área em eitos foi o Modelo 1 (base), seguido do modelo 4 (variação 2). No entanto, o modelo 4 tem a vantagem de controlar o volume empilhado de forma eficiente. Portanto, este foi o melhor modelo avaliado.

**Palavras-chave:** Programação Linear Inteira, Problema das P-Mediana, Sistemas de informação geográfica.

## ABSTRACT

This study aimed to stratify working divisions within *Eucalyptus* spp. stands, located in Minas Gerais state, which had attained cutting age, using Integer Linear programming (ILP) and Geographic Information Systems (GIS), to minimize log transportation inside the stands and help Forest Harvesting short-term planning. As a starting point, the whole method was divided into two parts: First, It was performed a preliminary processing on data to obtain the model coefficients; and second, the modeling process itself. The initial processing was done in GIS environment and it consisted in identifying the possible locations to stack wood and subdivide the stands, creating the Volume Units (VU) that were later destined for stacking. To facilitate establishing the Pile Units (PU) were placed points equally spaced in 1.5 m in areas suitable for wood stacking (slopes lower than 27°). The evaluated models were, in addition to the classical formulation of the P-Median and the Capacitated P-Median problems, 4 developed Alternative models, totaling 6 models. The objective function aimed to minimize the sum of all distances (Euclidian distance) to transport and stack the wood of each one of the VU to the PU. The Alternative models had constrains related to PU wood volume control, adopting stacking capacity limits (Alternative 2 and 4), and PU grouping (Alternative 1 and 3), with the intention of forcing the union of neighbor PU, applying penalties to the objective function. All models were processed fixing a maximum time of 2 hours, when the solutions were evaluated. It was used the Branch-and-bound algorithm to solve them. At the end of the first part, were obtained and processed 29 sectors, totaling 182.89 hours. The tested models presented excessive number of decision variables as well as constrains, what made the processing slow. The results showed that the strategy of using stacking capacity limits constrains were more consistent than the original strategy. The most effective model to stratify the stands were Model 1 (Original P-Median problem) and Model 4 (Alternative 2). Nevertheless, between these two models, the second one controls the volume of stacking wood. Therefore, the Alternative 2 is the best model.

**Key-words:** Integer Linear programming, P-Median Problem, Geographic Information Systems

## LISTA DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Exemplo de duas etapas da atividade de colheita florestal. a) Operação de corte de árvores de Eucalyptus com a utilização de Harvester; b) operação de extração da madeira utilizando-se um Forwarder. 2008. ....  | 29 |
| Figura 2  | Mapa da localização da área de estudo no estado de Minas Gerais, na divisa dos municípios de Ferros e Santa Maria de Itabira.....  | 42 |
| Figura 3  | Mapa do projeto florestal discriminado, evidenciando a classificação quanto ao uso do solo (a) e elevação (b). ....  | 43 |
| Figura 4  | Fluxograma das fases do microplanejamento da colheita florestal – produção de mapas.....   | 44 |
| Figura 5  | Ilustração da formação de pilhas de toras de madeira nas divisas entre os talhões e as estradas, na empresa estudada. Fonte: Pereira-Filho, 2012.....  | 46 |
| Figura 6  | Mapa de Krigagem gerado para a variável volume (m <sup>3</sup> ), no projeto florestal estudado.....   | 52 |
| Figura 7. | Classificação do relevo e formação das UPs, sendo: a) modelo de elevação digital gerado; b) modelo de inclinação (em graus) gerado; c) reclassificação do modelo de inclinação em áreas aptas (Classe 1) e não aptas (Classe 2) para estocagem de madeira e d) alocação das UPs nas áreas de Classe 1..... | 56 |
| Figura 8  | Exemplificação das unidades de volume (UV) geradas para as áreas do talhão 15, em que a) Krigagem da variável volume (m <sup>3</sup> ); b) subdivisão de todo o talhão usando uma grid de dimensões 10 x10 m e c) detalhe da UV.....   | 57 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 9  | Exemplo ilustrativo do funcionamento da restrição de agrupamento (9). .....  | 63 |
| Figura 10 | Gráficos do tempo de processamento (s) em função do número de restrições para cada modelo estudado. ....   | 75 |
| Figura 11 | Gráficos do tempo de processamento (s) em função do número de variáveis de decisão para cada modelo estudado. ....   | 76 |
| Figura 12 | Qualidade da solução encontrada para os seis modelos envolvendo os cenários gerados (Opt = solução ótima encontrada; Apr = solução aproximada encontrada ao final de duas horas de processamento; NS = nenhuma solução encontrada ao final de duas horas de processamento e Inf = solução inactivável). ....                                   | 79 |
| Figura 13 | Mapas apresentando os resultados dos seis modelos para o setor 17 (setor de área contínua mecanizada), sendo: a) Modelo 1 (base); b) Modelo 2 (base capacitado); c) Modelo 3 (variação 1); d) Modelo 4 (variação 2); e) Modelo 5 (variação 3) e f) Modelo 6 (variação 4).....  | 83 |
| Figura 14 | Gráficos apresentando os totais volumétricos de cada UP seleccionada dos seis modelos para o setor 17, sendo: a) Modelo 1 (Base); b) Modelo 2 (Base Capacitado); c) Modelo 3 (Variação 1); d) Modelo 4 (Variação 2); e) Modelo 5 (Variação 3); e f) Modelo 6 (Variação 4). A linha horizontal indica a capacidade máxima de armazenamento..... | 85 |
| Figura 15 | Mapas apresentando os resultados dos seis cenários estudados para o setor 19 (setor de área descontínua mecanizado), sendo: a) Modelo base; b) Modelo base capacitado; c) Variação 1; d) Variação 2; e) Variação 3 e f) Variação 4.....  | 88 |

- Figura 16 Mapas apresentando os resultados dos modelos base (a) e base capacitado (b) para o setor 29. .... 89
- Figura 17 Gráficos apresentando os totais volumétricos armazenados em cada UP selecionada dos seis modelos para o setor 19, sendo: a) Modelo 1(Base); b) Modelo 2 (Base Capacitado); c) Modelo 3 (Variação 1); d) Modelo 4 (Variação 2); e) Modelo 5 (Variação 3); e f) Modelo 6 (Variação 4). A linha horizontal indica a capacidade máxima de armazenamento..... 90

## LISTA DE TABELAS

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | Apresentação e definição das unidades de trabalho utilizadas no estudo.....   | 51 |
| Tabela 2 | Especificações dos modelos avaliados para a resolução do problema envolvendo a estratificação espacial do talhão na colheita florestal. ....        | 67 |
| Tabela 3 | Valor da função objetivo (em metros) para os 29 setores do projeto florestal estudado, considerando-se os seis modelos de solução do problema. .... | 72 |
| Tabela 4 | Número de variáveis de decisão e restrições para os 29 setores do projeto florestal estudado, considerando-se os seis modelos testados. ....        | 73 |
| Tabela 5 | Número total de eitos obtidos, após o pós-processamento, para os 174 cenários gerados. ....   | 81 |
| Tabela 6 | Número total de pilhas ativadas, após o processamento dos modelos, para os 174 cenários gerados.....  | 86 |

## LISTA DE APÊNDICES

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| APÊNDICE A | □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 1. .... | 103 |
| APÊNDICE B | □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 2. .... | 104 |
| APÊNDICE C | □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 3. .... | 105 |
| APÊNDICE D | □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 4. .... | 106 |
| APÊNDICE E | □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 5. .... | 107 |
| APÊNDICE F | □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 6. .... | 108 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                |                                     |
|----------------|-------------------------------------|
| h              | horas                               |
| min            | minutos                             |
| s              | segundos                            |
| °C             | graus Celsius                       |
| ha             | hectares                            |
| m              | metros                              |
| m <sup>3</sup> | metros cúbicos                      |
| St             | metros estéreos                     |
| PO             | pesquisa operacional                |
| PL             | programação linear                  |
| PLI            | programação linear inteira          |
| PLIM           | programação linear inteira mista    |
| FO             | função objetivo                     |
| St             | submetido a ( <i>subjected to</i> ) |
| VD             | variáveis de decisão                |
| UV             | unidade de volume                   |
| UP             | unidade de pilha                    |
| SIG            | sistemas de informação geográfica   |
| <i>i</i>       | índice referente à UV               |
| <i>j e k</i>   | índices referentes às UPs           |
| $\sum$         | Somatório                           |
| $\forall$      | Qualquer                            |



## SUMÁRIO

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 19 |
| <b>2</b>       | <b>OBJETIVOS</b> .....   | 22 |
| <b>2.1</b>     | <b>Objetivo geral</b> .....  | 22 |
| <b>2.2</b>     | <b>Objetivos específicos</b> .....   | 22 |
| <b>3</b>       | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....   | 24 |
| <b>3.1</b>     | <b>Planejamento florestal</b> .....  | 24 |
| <b>3.2</b>     | <b>Colheita florestal</b> .....  | 26 |
| <b>3.2.1</b>   | <b>Etapas da colheita florestal</b> .....  | 28 |
| <b>3.2.1.1</b> | <b>Corte</b> .....   | 28 |
| <b>3.2.1.2</b> | <b>Desgalhamento e destopamento</b> .....  | 29 |
| <b>3.2.1.3</b> | <b>Traçamento</b> .....  | 30 |
| <b>3.2.1.4</b> | <b>Descascamento</b> .....   | 31 |
| <b>3.2.1.5</b> | <b>Extração</b> .....  | 31 |
| <b>3.2.1.6</b> | <b>Carregamento</b> .....  | 32 |
| <b>3.3</b>     | <b>Pesquisa operacional</b> .....  | 32 |
| <b>3.3.1</b>   | <b>A programação linear</b> .....  | 36 |
| <b>3.3.1.1</b> | <b>O modelo genérico de programação linear</b> .....                                 | 38 |
| <b>3.3.1.2</b> | <b>O problema das P-medianas</b> .....   | 40 |
| <b>4</b>       | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | 42 |
| <b>4.1</b>     | <b>Caracterização da área de estudo</b> .....  | 42 |
| <b>4.2</b>     | <b>Descrição técnica do problema abordado no estudo</b> .....                        | 43 |
| <b>4.2.1</b>   | <b>Método tradicional</b> .....  | 47 |
| <b>4.2.2</b>   | <b>Método proposto</b> .....   | 48 |
| <b>4.3</b>     | <b>Preparo da base de dados</b> .....  | 49 |
| <b>4.3.1</b>   | <b>Seleção das unidades de trabalho</b> .....  | 49 |
| <b>4.3.2</b>   | <b>Aspectos produtivos</b> .....   | 51 |
| <b>4.3.3</b>   | <b>Aspectos geográficos</b> .....  | 53 |
| <b>4.3.3.1</b> | <b>Unidades de pilha (UP)</b> .....  | 53 |
| <b>4.3.3.2</b> | <b>Formação das unidades de volume (UV)</b> .....                                    | 57 |
| <b>4.3.4</b>   | <b>Obtenção das matrizes dos coeficientes dos modelos</b> .....                      | 58 |
| <b>4.4</b>     | <b>Modelagem matemática</b> .....  | 59 |
| <b>4.4.1</b>   | <b>Implementação computacional, geração e avaliação dos cenários testados</b> .....  | 68 |
| <b>4.4.2</b>   | <b>Pós-processamento dos dados</b> .....   | 69 |
| <b>5</b>       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | 71 |
| <b>5.1</b>     | <b>Processamento dos modelos</b> .....   | 71 |
| <b>5.2</b>     | <b>Qualidade da solução obtida</b> .....   | 78 |
| <b>5.3</b>     | <b>Formação dos eitos, locação das pilhas e sentido de extração da madeira</b> ..... | 80 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                     | <b>92</b>  |
| <b>7</b> | <b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b> | <b>93</b>  |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>      | <b>94</b>  |
|          | <b>APÊNDICES .....</b>                      | <b>102</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a colheita florestal é classificada como uma das atividades mais caras do setor florestal, contribuindo direta e significativamente para o custo final de produção da madeira, seja ela destinada à produção de celulose e carvão, ou ainda, para usos mais nobres, como a serraria. Ela compreende desde a fase de corte (ou abate), desgalhamento e seccionamento das árvores em comprimentos comerciais desejáveis, até o arraste ou baldeio das toras às margens das estradas, onde a madeira é empilhada para que, posteriormente, seja transportada até os pátios das fábricas.

Diversos fatores podem influenciar a realização da colheita florestal, contribuindo para a elevação dos custos ou, ainda, impossibilitando, parcial ou totalmente, a realização das operações envolvidas. Entre esses fatores destacam-se as condições climáticas, a época do ano, o regime de chuvas, a temperatura, a umidade do ar e a velocidade do vento, além das condições edáficas, como tipo de solo e relevo da região, e presença de possíveis adversidades na área, como buracos, barrancos, galhos grossos e tocos altos. A análise desses fatores, conciliada às especificações técnicas dos equipamentos, permite a adoção de um sistema de colheita ideal para determinado local (manual, mecanizado ou semimecanizado). No entanto, normalmente, pouca atenção é dada ao planejamento operacional dessa atividade, envolvendo esse nível de detalhe.

O planejamento eficiente da colheita florestal é essencial para os gestores da área, tendo em vista a otimização sequencial das operações, principalmente quanto à melhoria da qualidade do produto e do serviço, das condições de saúde e segurança dos trabalhadores, à minimização dos impactos ambientais, ao aumento de produtividade e à redução dos custos (MACHADO; LOPES, 2008).

A viabilidade técnica, econômica e ambiental dos módulos de colheita utilizados por uma empresa está intimamente ligada a um bom planejamento. Por meio desse recurso pode-se, por exemplo, definir as melhores rotas para a remoção de madeira do talhão, reduzindo, assim, a movimentação de máquinas no solo, contribuindo para a redução dos processos de compactação e erosão, bem como para a redução dos custos, além de definir os melhores locais para realizar o empilhamento da madeira e subdividir os talhões (eitos) para ação das diferentes frentes de máquinas de colheita florestal a serem adotadas, aprimorando a logística das operações.

No entanto, para controlar e equacionar o número de variáveis que interferem na atividade de colheita florestal e alcançar a otimização desejada, é necessário que a aplicação de algumas tecnologias seja desmistificada. Entre elas, podem-se citar os sistemas de informação geográfica (SIG), os métodos estatísticos sofisticados e a pesquisa operacional, por meio da programação linear clássica. Assim, poder-se-ia adotar uma metodologia inteiramente científica, em detrimento dos métodos empíricos comumente empregados no planejamento da colheita florestal.

Situações ideais, como a retratada, além de serem um grande desafio, permitem auxiliar os gestores florestais nos processos de tomada de decisão. Assim, além de permitir a agilização desses processos, os prováveis imprevistos que podem acontecer durante a realização das operações em campo podem ser antecedidos.

Nesse contexto, levando-se em conta a crescente expansão do mercado florestal nacional e a entrada de novas empresas no setor florestal, evidencia-se que o desafio é manter a sustentabilidade do empreendimento florestal, tornando as organizações mais competitivas. Isso somente será alcançado por meio do aumento da eficiência, não somente dos recursos produtivos, mas também do processo de gestão da produção.

Para que esse aumento da eficiência seja alcançado, torna-se imprescindível a adoção de técnicas modernas de pesquisa operacional que irão auxiliar o planejamento da colheita florestal e os demais processos de tomada de decisão. Assim, esse método se torna indispensável para produtores e técnicos florestais que buscam obter os maiores lucros de sua floresta e, ao mesmo tempo, almejam a sustentabilidade econômica e ambiental de suas operações, mantendo a segurança de seus funcionários.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente estudo foi realizado com o objetivo geral de estratificar espacialmente compartimentos de trabalho (eitos) nas unidades de manejo a serem colhidas, minimizando o deslocamento de máquinas, a partir do microplanejamento otimizado integrado às operações de corte, baldeio e arraste, em um plantio comercial de *Eucalyptus* sp., por meio do uso de programação linear inteira (PLI).

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Testar, adaptar e avaliar o uso de modelos de programação linear inteira, considerando o problema das P-mediana (modelo base), no microplanejamento otimizado da colheita florestal, nas unidades de manejo (talhão).
- b) Desenvolver um conjunto de restrições (capacidade volumétrica, número e agrupamento de pilhas) no modelo base, para atender aos requisitos técnicos das operações a serem planejadas.
- c) Gerar estratos espaciais (eitos de trabalho) na marcação de áreas de trabalho, para as etapas de corte, baldeio e arraste da atividade de colheita florestal.
- d) Determinar locais ótimos de instalação das pilhas de estocagem de madeira, via modelo matemático de programação linear inteira, quando possível.

- e) Integrar o uso de métodos relacionados à geotecnologia e à geoestatística à pesquisa operacional, como forma de aprimoramento do planejamento da colheita florestal.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Planejamento florestal

O planejamento florestal pode ser definido como a identificação de atividades, bem como a sincronia das mesmas ao longo do tempo, para que seja possível alcançar os objetivos pré-definidos dentro do manejo florestal (SESSIONS; BETTINGER, 2001). De acordo com Demers, Long e Clausen (2001), um plano de manejo dos recursos naturais ou florestais é uma declaração de objetivos específicos que o manejador tem para as suas terras, seguidos de uma série de atividades que deverão ser realizadas para que esses objetivos sejam alcançados.

Um plano de manejo não precisa ser composto por um documento complexo, mas deve estar lastreado em princípios e métodos apropriados. Independente do propósito, é importante que o seu plano inclua informações relativas aos objetivos, à localização e ao histórico do imóvel, à avaliação dos recursos disponíveis, recomendações de manejo, agendamento das atividades e informações suplementares (DEMERS; LONG; CLAUSEN, 2001).

O objetivo do planejamento florestal é fornecer apoio para a tomada de decisão florestal, de modo que a melhor combinação de entradas e saídas atenda, exclusivamente, aos objetivos definidos na gestão da propriedade florestal, levando-se em consideração não somente a renda a ser gerada, mas também a promoção de aspectos de lazer e a conservação (KANGAS; KANGAS; KURTIILA, 2008).

Segundo Machado e Lopes (2008), o planejamento florestal deve: a) fornecer subsídios técnicos para o planejamento estratégico da empresa; b) coordenar os planos operacionais de curto prazo, para atender às metas do plano estratégico; c) avaliar economicamente os sistemas comumente adotados e as



alternativas para definição das espécies, regime de manejo, capacidade produtiva, rotação, etc.; d) obter, por meio de um sistema de cadastro, informações relativas às plantações, incluindo rendimentos atuais e futuros, para quantificar a disponibilidade de madeira; e) fornecer subsídios técnicos necessários a todas as operações florestais e f) proporcionar senso de direção, centralizar esforços, guiar os planos e decisões e avaliar o progresso.

O planejamento e o processo de tomada de decisão na área florestal são realizados, tradicionalmente, de acordo com uma estrutura hierárquica, em que a informação é passada do nível mais alto para o mais baixo e as decisões são baseadas nas informações disponíveis em cada nível (ANDERSSON, 2005). Os níveis nessa hierarquia, do mais alto para o mais baixo, são, normalmente, denominados estratégico, tático e operacional, podendo variar de acordo com a escala de tempo adotada (DAVIS et al., 2000; ANDERSSON, 2005; KANGAS; KANGAS; KURTIILA, 2008).

O nível estratégico de análises no planejamento do manejo florestal representa uma estratégia de longo prazo, sendo um importante balizador no estabelecimento de metas regionais e objetivos a serem alcançados no curto e no médio prazo (CHURCH; MURRAY; BARBER, 2000). Segundo Öhman e Eriksson (2010), esse nível de planejamento objetiva estabelecer metas de volume de madeira a serem colhidas e estratégias de regeneração.

O nível tático de análises representa a ligação de dois níveis básicos de resolução espacial, a estratégica e a operacional, que é realizada pela tentativa de traduzir soluções estratégicas para uma resolução espacial mais fina e simultaneamente mais detalhada e, talvez, até apresente novas restrições (CHURCH; MURRAY; BARBER, 2000). Öhman e Eriksson (2010) consideram a localização das áreas onde ocorrerá a colheita como uma prerrogativa do nível tático no planejamento hierárquico.

Por fim, o planejamento em âmbito operacional tem referência nas informações provenientes do planejamento estratégico e tático da empresa, como decisões de colheita dos talhões selecionados para o corte e o tipo de produto a ser gerado da floresta, e retrata as operações que ocorrem em uma escala de tempo diária, semanal ou mensal (DAVIS et al., 2000).

O planejamento operacional visa antecipar os problemas e estabelecer rotinas e alternativas operacionais para atingir as metas de produção pré-estabelecidas (MACHADO; LOPES, 2008). A alocação de recursos, como máquinas florestais, equipes de trabalho e caminhões, é um exemplo de decisões operacionais abordadas no nível operacional de planejamento (GUNN, 1991).

### **3.2 Colheita florestal**

Segundo Machado, Silva e Pereira (2008), a colheita florestal pode ser definida como um conjunto de operações efetuadas no maciço florestal, que visa preparar e levar a madeira até o local de transporte, usando técnicas e padrões estabelecidos, com a finalidade de transformá-la em produto final. A colheita e o transporte florestal são considerados as etapas mais importantes, do ponto de vista econômico, devido à participação no custo final do produto e também aos riscos de perdas envolvidos nessas atividades (MACHADO; LOPES, 2000). Ela representa a operação final de um ciclo de produção florestal, na qual são obtidos os produtos mais valiosos, constituindo um dos fatores que determinam a rentabilidade florestal (ARCE; MACDONAGH; FRIEDL, 2004).

Historicamente, a colheita florestal no Brasil passou por profundas mudanças nas últimas décadas, com grandes avanços técnicos, operacionais, ergonômicos e, sobretudo, produtivos. Até a década de 40 do século XX, praticamente não havia emprego de máquinas nas atividades de colheita florestal, com as operações de corte sendo realizadas de forma rudimentar, com

uso de machado, foices e serras. A extração também se baseava em métodos rudimentares, utilizando trabalho braçal e animal. A partir da década de 1940 e até os dias atuais, muitas mudanças ocorreram no setor, com as operações evoluindo de processo manual para semimecanizado, adquirindo um nível mais significativo em termos de mecanização. Durante a década de 1980, as principais inovações foram a substituição de motosserras por *Feller Bunchers* e *Harvesters*, surgindo também os *Skidders*, os quais passaram a substituir os tratores agrícolas adaptados para o processo de extração florestal. Na década de 1990, houve uma grande modernização do processo de mecanização da colheita florestal, devido, sobretudo, à abertura das importações. Atualmente, a mecanização da colheita vem evoluindo a cada ano, trazendo grandes avanços tecnológicos (MACHADO; SILVA; PEREIRA, 2008; MALINOVSKI; CAMARGO; MALINOVSKI, 2008).

De acordo com Malinovski, Camargo e Malinovski (2008), o sistema de colheita compreende um conjunto de elementos e processos que envolvem a cadeia de produção e todas as atividades parciais, desde a derrubada até a madeira posta no pátio da indústria transformadora. As condições ambientais podem alterar parte do sistema, fazendo com que haja a necessidade de trocar elementos, conforme o trabalho a ser executado.

Segundo Lopes et al. (2009), a avaliação de sistemas de colheita de madeira, independente do grau de mecanização utilizado, é uma ferramenta fundamental para correções ou qualquer alteração do processo de produção, visando à racionalização e à otimização dos recursos utilizados.

A produtividade das operações de colheita de madeira é uma das principais variáveis que influenciam a viabilidade da retirada de madeira dos projetos florestais, sendo, normalmente, inversamente proporcional ao custo por m<sup>3</sup> produzido e diretamente influenciada pelas variáveis do terreno, do povoamento e do planejamento feito pelos técnicos e exigido pelas fontes

consumidoras (MALINOVSKI et al., 2006). Ainda segundo os mesmos autores, uma adequada predição da produtividade é de suma importância para que sejam realizados orçamentos adequados para as atividades de colheita de madeira nas empresas, bem como estudos para a viabilização de novos sistemas a serem implantados e dimensionamento das máquinas que serão alocadas para cada projeto.

Apesar de muitas empresas florestais ainda adotarem sistemas semimecanizados de colheita de madeira, nos últimos dez anos, no Brasil, houve um incremento significativo do grau de mecanização das operações. Com o advento da globalização da economia, aumentou a concorrência internacional, que trouxe consigo exigências crescentes de qualidade e produtividade. Para acompanhar o incremento da produção e garantir o abastecimento das indústrias a custos compatíveis, as empresas do setor da celulose entenderam que, na maioria das vezes, a solução é aumentar o nível de mecanização das operações de colheita de madeira para obter produções elevadas a baixos custos (TARNOWSKI; SCHNEIDER; MACHADO, 2009).

### **3.2.1 Etapas da colheita florestal**

A colheita florestal inclui as etapas de corte (derrubada, desgalhamento, destopamento e traçamento), descascamento (quando executado no campo), extração e carregamento.

#### **3.2.1.1 Corte**

O corte, segundo Sant'Anna (2008), representa a primeira etapa da atividade de colheita florestal e tem grande influência na realização das operações subseqüentes, que incluem derrubada, desgalhamento, traçamento e

empilhamento. Ainda segundo o mesmo autor, a operação de corte pode ser realizada por meio de três métodos: manual, semimecanizado e mecanizado. O manual é o mais antigo e, nele, utilizam-se equipamentos, como machados, traçador, facão, etc.; no método semimecanizado, geralmente, utiliza-se a motosserra com capacidade para derrubar, desgalhar e traçar, e, em sistemas mecanizados, são empregadas máquinas, como *Harvester* e *Feller Buncher* (Figura 1).

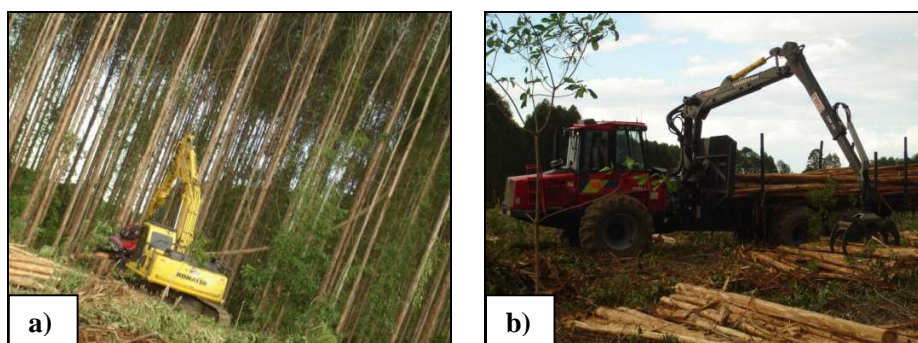


Figura 1 Exemplo de duas etapas da atividade de colheita florestal. a) Operação de corte de árvores de *Eucalyptus* com a utilização de *Harvester*; b) operação de extração da madeira utilizando-se um *Forwarder*. 2008.

Para Salmeron (1980), de maneira geral, a intensidade de mecanização é afetada por duas variáveis, que são: a) condições locais, como topografia, tipo de solo e índice pluviométrico, constituindo fatores importantes na escolha de um equipamento, chegando a ser limitante em certas regiões e b) existência do equipamento apropriado no mercado, uma vez que a diversificação de equipamentos ainda é restrita.

### 3.2.1.2 Desgalhamento e destopamento

A operação de desgalhamento consiste na retirada de galhos e do ponteiro das árvores que foram previamente derrubadas, definindo o fuste

comercial. O desgalhamento pode ser manual, utilizando machado, foice ou facão; semimecanizado, por meio da utilização de uma motosserra ou, ainda, mecanizado, com a utilização de *Harvesters* ou *Delimbers* (SANT'ANNA, 2008).

Conforme cita Sant'anna (2008), o rendimento dessas operações depende de fatores relacionados ao diâmetro da árvore, ao diâmetro e à densidade de ramos, ao comprimento do fuste, à ferramenta utilizada nas operações, além da topografia e da qualidade do desgalhamento requerida.

### **3.2.1.3 Traçamento**

Também conhecido como toragem, o traçamento consiste em seccionar a árvore. Esta operação deve iniciar-se pela base da árvore, indo em direção ao topo. A operação de traçamento pode ser realizada tanto no canteiro de corte como numa estrada de processamento. O traçamento dos toretes, nas dimensões estabelecidas, pode ser realizado de forma manual, utilizando-se machado, serra de arco e traçador, mas, geralmente, é semimecanizado, utilizando motosserra. Esta atividade também pode ser realizada de forma mecanizada, com a utilização de um *Harvester* (SALMERON, 1980).

Sob a ótica de Arce, MacDonagh e Friedl (2004), o traçamento das árvores derrubadas nas operações de colheita florestal pode ser considerado um processo de tomada de decisões, em um horizonte de curto prazo. A posição dos cortes que definirão as toras deve ser decidida no local, após a visualização da árvore abatida, e esta tarefa, muitas vezes, é realizada sem o suporte de ferramentas de otimização, mesmo considerando a obtenção de múltiplos produtos da floresta.

#### 3.2.1.4 Descascamento

A operação de descascamento tem como objetivo separar a casca do tronco, em razão das necessidades do produto final. Diferentemente das empresas de celulose e das serrarias, as empresas de carvão não executam essa etapa (SANT'ANNA, 2008). O descascamento pode ser realizado de forma manual ou mecânica, no povoamento florestal ou no pátio da indústria.

O descascamento no campo facilita a perda de água da madeira (secagem natural), reduz o volume a ser transportado e, ainda, evita a exportação de nutrientes, tendo como principal desvantagem o fato de a madeira poder rachar com mais facilidade. Esta operação pode ser feita de forma manual (com cavadeiras, facões ou machadinhas) ou mecanizada (com descascador mecânico móvel ou por meio do cabeçote do *Harvester*) (SANT'ANNA, 2008).

#### 3.2.1.5 Extração

A extração refere-se à movimentação da madeira desde o local de corte até a estrada, o carreador ou o pátio intermediário. Existem vários sinônimos para esta operação, muitas vezes dependendo do modo como ela é realizada ou do tipo de equipamento utilizado, podendo-se citar os mais comuns, como baldeio, arraste, encoste e transporte primário (SEIXAS, 2008).

Segundo Seixas (2008), no baldeio, a madeira é transportada, geralmente, por tratores que têm uma plataforma, como um *trailer* ou um trator autocarregável como, por exemplo, o *Forwarder* (Figura 1). Já a etapa de arraste implica uma parte, ou o todo, da carga estar apoiada sobre o solo, podendo ser realizada por um guincho ou trator arrastador *Skidder*, etc.

A fase final da colheita florestal é o transporte primário da madeira, o qual ocorre após a derrubada ou processamento das árvores, consistindo na movimentação da madeira colhida do interior dos talhões até as margens das estradas florestais ou pátios. No sistema de toras curtas, geralmente, são utilizados os tratores agrícolas autocarregáveis e os *Forwarders* (SIMÕES; FENNER, 2010).

#### **3.2.1.6 Carregamento**

Segundo Minette et al. (2008), a operação de carregamento é o meio de ligação entre a extração e o transporte florestal secundário ou principal, e consiste na operação de carregar/descarregar os veículos que serão utilizados no transporte de madeira.

As operações de carregamento da madeira podem ser realizadas de forma manual, utilizando toras de pequenos comprimentos de diâmetro e de baixo peso específico; semimecanizado, com o auxílio de cabos de aço acionados por animais, trabalhadores em sistemas de catracas, pequenos tratores ou pelo próprio veículo de transporte, e mecanizada, por meio de carregadores de braço hidráulico ou grua (MINETTE et al, 2008).

### **3.3 Pesquisa operacional**

O planejamento da colheita florestal requer decisões lógicas, levando em consideração a disponibilidade de equipamentos, a área a ser explorada, as rotas a serem utilizadas, os horários de trabalho das equipes e a autonomia dos equipamentos de colheita, bem como a mão de obra e o sistema de colheita adotado, dentre vários outros tópicos.



A pesquisa operacional (PO), de acordo com Silva (1995), pode ser definida como um método científico de tomada de decisões. De maneira geral, consiste na descrição de um sistema organizado com um auxílio de um modelo e, pela experimentação deste, na descoberta da melhor maneira de operar esse sistema.

O termo pesquisa operacional é uma tradução (brasileira) direta do termo em inglês *Operational Research*, que, em Portugal, foi traduzido como investigação operacional e, nos países de língua hispânica, por *Investigación Operativa* (ARENALES; ARMENTANO; MORABITO, 2007).

Os primeiros escritos da pesquisa operacional surgiram em 1950 e, desde então, as indústrias utilizam essa técnica para o apoio à decisão. Ela proporciona ao analista oriundo de diferentes áreas do conhecimento uma maneira estruturada e sistemática de encontrar soluções dos problemas do sistema produtivo, sejam eles relacionados ao planejamento, à execução ou ao controle das operações (PINTO, 2005).

De acordo com Arenales, Armentano e Morabito (2007), recentemente, a pesquisa operacional também tem sido chamada de ciência e tecnologia de decisão. Os autores citam que o componente científico está relacionado a ideias e a processos para articular e modelar problemas de decisão e às restrições sob as quais deve operar. Esses autores mencionam, ainda, que o componente tecnológico está relacionado a ferramentas de *software* e *hardware* para coletar e comunicar dados, organizá-los e usá-los para gerar e otimizar modelos, reportando os resultados.

Segundo Taha (1994), a pesquisa operacional almeja determinar o melhor curso de ação (ótimo) de um problema de decisão com restrição de recursos limitados. O termo pesquisa operacional está associado, em geral e quase exclusivamente, com a aplicação de técnicas matemáticas a problemas de decisão, representados e analisados por meio de modelos. Os problemas de

decisão incluem, com frequência, fatores intangíveis para o planejador, tais como condições econômicas de mercado e variações ambientais. Para poder representar esses fatores, em termos de modelos matemáticos, se requer uma grande habilidade por parte do planejador.

Os modelos matemáticos, que são representações abstratas de situações reais (DYKSTRA, 1984), são úteis na administração florestal para tomar decisões com consequências previsíveis, quando bem construídos, validados e aplicados. A partir do auxílio desses modelos, podem ser realizadas simulações sobre situações próximas a de uma floresta real. As primeiras modelagens e os métodos para a resolução dos modelos matemáticos surgiram durante a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de planejar operações militares (TAHA, 1994; BUONGIORNO; GILLESS, 1987). A partir disso, surgiu uma série de ferramentas enquadradas na área de conhecimento da pesquisa operacional (PO).

A colheita florestal vem sendo alvo de diversos estudos na área de pesquisa operacional, como forma de auxiliar e otimizar o planejamento das operações envolvidas nessa atividade, em todos os níveis hierárquicos de planejamento.

Trabalhos abrangendo programação linear no nível hierárquico de planejamento estratégico envolvem, normalmente, problemas de agendamento da colheita florestal, considerando regulação florestal (DIAZ-BALTEIRO; BERTOMEU; BERTOMEU, 2009). Outros trabalhos encontrados na literatura envolvendo o uso da programação linear no horizonte estratégico podem ser encontrados em Andersson e Eriksson (2007), Chen, Zheng e Chang (2011), Chinneck e Moll (1995), De Mello et al. (2008), Forsburg, Frisk e Rönnqvist (2005), Hiltunen et al. (2009), Rideout et al. (2008) e Wu, Ding e Wang (2007).

Segundo Mitchell (2004), o agendamento da colheita florestal apresenta algumas características específicas na formulação dos modelos de programação linear. De acordo com o autor, o horizonte de planejamento dessa atividade,

geralmente, é decorrente de um curto período de tempo, sendo necessário responder, dentre outros, aos seguintes questionamentos: Quando as unidades de manejo serão colhidas? Quem será responsável pela colheita? Que tipo de produto florestal será produzido? Qual consumidor será abastecido pela produção? Qual a sequência de unidades selecionadas para a colheita?

A estratégia de sequência ótima de corte dos talhões se insere no planejamento tático/operacional de uma empresa florestal, conforme formulado por Boston e Bettinger (2001) em seus estudos. Existem outros trabalhos que retratam o tema, como os encontrados em Andalaft et al. (2003), Bettinger, Boston e Sessions (1999), Epstein et al. (1999), Johnson e Scheurman (1977), Lima et al. (2011), Meilby, Strange e Thorsen (2011) e Najafi et al. (2008).

No nível hierárquico operacional, Martell, Gunn e Weintraub (1998) relatam a importância da alocação do maquinário de colheita, da definição dos múltiplos produtos em cada unidade de colheita e da sua alocação de acordo o uso e a definição de sistemas de transporte e pátios de estocagem de madeira. Os autores ainda destacam a maior utilização de modelos, contemplando interações espaciais e temporais como sendo um dos desafios da pesquisa operacional aplicada ao manejo florestal. Essa visão do planejamento florestal sob a ótica espacial também já foi abordada por Gomide (2009).

Lima et al. (2011) propuseram uma metodologia envolvendo técnicas baseadas em sistemas de informações geográficas (SIG) integradas à pesquisa operacional (programação linear), objetivando obter a alocação ótima de pátios de estocagem de madeira. Estes autores chegaram à conclusão de que a combinação de ambas as tecnologias foi eficiente no planejamento da colheita florestal.

Malinovski et al. (2008) desenvolveram, usando técnicas matemáticas e funcionalidades disponíveis no sistema de informações geográficas GRASS, uma ferramenta tecnológica capaz de calcular e otimizar a distância média de

extração (DME) de madeira com *forwarder* (um tipo de trator usado no baldeio das operações), em diferentes tamanhos e formatos de talhões. A ferramenta desenvolvida, chamada de modelo otimizado, compartimentaliza o talhão em função da menor distância de extração. Os resultados mostraram que o modelo otimizado desenvolvido foi eficiente e flexível.

Outras aplicações da programação linear, para auxílio ao planejamento no manejo florestal, podem ser encontradas na literatura, como, por exemplo, o no agendamento das operações de desbaste (CHEN; ZHENG; CHANG, 2011).

### **3.3.1 A programação linear**

A programação linear (PL) é uma técnica de otimização com ampla utilização. Ela pode ser aplicada a muitos problemas diferentes, alguns dos quais não são relacionados às ciências florestais ou, até mesmo, à ciência de manejo. A programação linear pode ser definida como um método de alocação de recursos limitados em diversas atividades que competem entre si por esses recursos, de maneira ótima (BUONGIORNO; GILLESS, 2003).

Segundo Leuschner (1984), a programação linear é a técnica mais utilizada na área florestal e, provavelmente, na programação matemática. De acordo com o autor, existem diversas razões para isso. Primeiro, esta técnica foi inventada e implementada durante a Segunda Guerra Mundial, sendo aprimorada ao longo dos anos. Segundo, pode ser utilizada em grandes bases de dados contendo muitas soluções alternativas, de maneira muito eficiente, usando o algoritmo simplex. Além disso, os algoritmos computacionais de PL são bem documentados e, geralmente, estão disponíveis na maioria dos sistemas computacionais, havendo, portanto, pouca dificuldade para implementá-los. Finalmente, as análises de sensibilidade são executadas facilmente para que as características da solução ótima possam ser examinadas da mesma maneira.

A dedicação por processos de modelagem de dados tem transformado o cenário florestal ao longo das décadas. Esta atitude se inspirou na necessidade de informações mais apuradas sobre a gestão do negócio florestal, em que muitas ferramentas foram desenvolvidas com a finalidade de acelerar os processos de tomada de decisão. Segundo Buongiorno e Gilles (2003), a primeira maneira prática de resolver modelos de programação linear, o método do simplex, foi inventada por George Dantzig, no final da década de 1940. No início, por meio do uso do simplex, somente pequenos problemas puderam ser solucionados, uma vez que eles eram resolvidos de forma manual ou usando uma calculadora comum. Atualmente, com o advento dos computadores e de programas específicos para a resolução desses modelos, podem ser resolvidos diversos problemas, envolvendo muitas variáveis de decisão e restrições.

Segundo Arce (1997), o êxito de uma técnica da PO pode ser medido pela difusão de sua utilização como ferramenta para a tomada de decisões. A programação linear (PL) é, desde sua aparição, no final da década de 1940, um dos métodos mais amplamente empregados na PO. Seu êxito contundente se deve, principalmente, à sua flexibilidade para descrever uma grande quantidade de situações reais nas áreas militar, industrial, agrícola, florestal, de transporte, economia, de sistemas de saúde e, inclusive, nas ciências sociais e do comportamento humano. De acordo com o autor, um fator importante na ampla difusão desta técnica é a disponibilidade de programas de computador muito eficientes para resolver problemas extensos e complexos. A PL pode ser considerada uma base para o desenvolvimento de outras técnicas da pesquisa operacional, incluindo a programação inteira, a estocástica, a do fluxo de redes, a quadrática, a não linear, etc.

De acordo com Rustagi (1978), o planejamento da colheita florestal demanda uma série de informações, como projeção da produção florestal, preços e custos de produção por talhão. Geralmente, o resultado desse conjunto de

informações confere aos modelos uma estrutura complexa e com elevado número de restrições e variáveis. Alguns critérios econômicos podem ser introduzidos na função objetivo e auxiliar na análise de projetos florestais.

Independente do tipo de modelo abordado, a PL apresenta versatilidade em formular as restrições ligadas ao manejo das operações florestais (ÖHMAN; ERIKSSON, 2002). Esses modelos podem governar a maioria das questões quantitativas, retratando-as por meio de expressões lineares. Entretanto, alguns artifícios devem ser introduzidos no modelo, quando o problema abrange variáveis não contínuas. Nesse caso, o uso da programação linear com variáveis inteiras e ou mistas se faz necessário.

### **3.3.1.1 O modelo genérico de programação linear**

A formulação de um problema de programação linear visa, basicamente, maximizar ou minimizar uma função linear, denominada função objetivo (FO), sujeita a um conjunto de restrições, também lineares, em forma de igualdades ou desigualdades, chamada de restrições, e um conjunto de condições de não negatividade (LEUSCHNER, 1984).

Os problemas de programação linear podem ser representados na forma padrão (quando as restrições do modelo de PL se apresentam na forma de equações) ou canônica (quando as mesmas se apresentam na forma de inequações), sendo ambos os formatos equivalentes. O problema linear generalizado com  $n$  alternativas em  $m$  restrições pode ser formulado de três maneiras alternativas, que são: por extenso, em notação  $\sum$  ou em notação matricial (RODRIGUEZ; LIMA, 1985).

A forma genérica de um modelo de PL em sua forma canônica é apresentado a seguir (RODRIGUEZ; LIMA, 1985; LEUSCHNER, 1984).

$$\begin{aligned}
 \text{FO: maximizar} \quad & Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \\
 \text{Sujeita a} \quad & A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n \leq r_1 \\
 & A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n \leq r_2 \\
 & \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \cdot \\
 & \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \cdot \\
 & \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \cdot \\
 & A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \dots + A_{mn}X_n \leq r_m \\
 & X_j \\
 & \forall i = 1, 2, 3, \dots, m \\
 & \forall j = 1, 2, 3, \dots, n
 \end{aligned}$$

As alternativas estão representadas pelas variáveis de decisão  $X_j$  e os seus coeficientes na função objetivo estão simbolizados por  $C_j$ , os quais formam um conjunto de constantes dadas. Os símbolos  $r_i$  representam as disponibilidades ou restrições impostas ao problema. Os coeficientes das variáveis de decisão nas restrições (matriz tecnológica) estão denotados por  $A_{ij}$ , em que o subscrito duplo serve para localizar cada coeficiente. Já que existem  $m$  restrições em  $n$  variáveis, os coeficientes  $A_{ij}$  formam uma matriz retangular de dimensão  $m \times n$ .

Para desenvolver um método geral de solução, o problema de PL deve ser expresso em um modelo genérico, comum. As propriedades desse modelo genérico de PL são as seguintes, segundo Taha (1994):

- a) Todas as restrições são equações com os segundos membros não negativos;
- b) Todas as variáveis são não negativas;

- c) O objetivo pode ser a maximização ou a minimização;
- d) Todas as equações e a função objetivo são lineares;
- e) Proporcionalidade: cada variável fornece certa contribuição à função objetivo e essa é diretamente proporcional ao nível da variável, ou seja, ao duplicar todos os recursos de entrada, duplica-se também o produto de sua saída;
- f) Aditividade: estipula que a contribuição total de todas as variáveis na função objetivo e seus requerimentos nas restrições é a soma direta das contribuições dos requerimentos individuais de cada variável.

### **3.3.1.2 O problema das P-medianas**

A localização de facilidades é um problema clássico na área de pesquisa operacional, constituindo um aspecto crítico do planejamento estratégico de empresas privadas e públicas. Exemplos típicos no setor público envolvem decisões de localização de centros de saúde, escolas e estações de bombeiros, enquanto, no setor privado, cita-se a localização de fábricas, de armazéns e de centros de distribuição. Em diversas situações, tais como em sistemas de distribuição, as decisões de localização de facilidades e de designação de clientes são feitas simultaneamente (ARENALLES; ARMENTANO; MORABITO, 2007). Um exemplo desta situação é a retratada pelo problema das P-medianas.

Um problema geral de locação de facilidades envolve um grupo de clientes distribuídos e um grupo de facilidades para servir à demanda desses clientes. Além disso, distâncias, tempo ou custos entre os clientes e as facilidades são mensurados por uma dada métrica. Possíveis questões a serem respondidas são: a) quais facilidades devem ser usadas? e b) quais clientes devem ser servidos de qual(is) facilidade(s) para que se minimize o custo total?.



Em adição a essa configuração genérica, um número de restrições surge a partir de uma aplicação específica (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2009).

Os problemas de locação de instalações são considerados de solução difícil, pertencendo à classe NP-difícil (do inglês *NP-hard*) (RESENDE; WERNECK, 2004), pois o esforço computacional para a sua solução cresce exponencialmente, devido ao alto número de combinações possíveis. Assim, torna-se praticamente impossível resolver problemas reais de grandes dimensões sob essa ótica (GAREY; JOHNSON, 1979).

Na área florestal, pode-se aplicar esta metodologia para a alocação de fábricas de celulose, pátios de estocagem de madeira (MARTINHAGO, 2012), plantas de carbonização e módulos de apoio à colheita florestal, entre outros.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido em um projeto pertencente à empresa Celulose Nipo-Brasileira, CENIBRA, localizado na divisa dos municípios de Ferros e Santa Maria de Itabira, no estado de Minas Gerais (Figura 2). O clima da região, segundo classificação de Köeppen, é denominado Cwa, clima subtropical úmido, com verão quente e chuvoso e inverno seco. A temperatura média anual é de 19,9 °C, a máxima anual é de 23,8 °C e a mínima, de 15,0 °C, apresentando umidade média anual de 73,2%, segundo dados da própria empresa. A região de estudo apresenta topografia acidentada, com altitudes variando de 640 a 1.016 m.

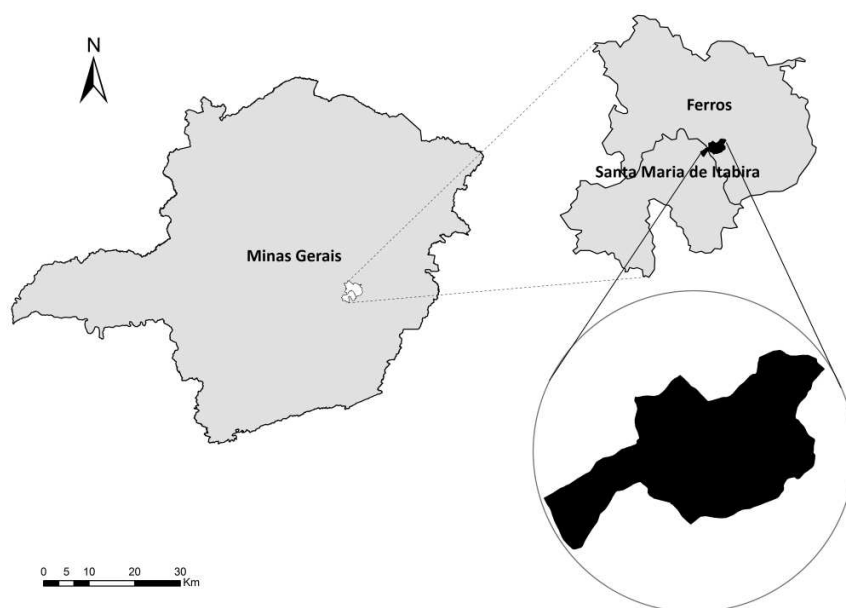


Figura 2 Mapa da localização da área de estudo no estado de Minas Gerais, na divisa dos municípios de Ferros e Santa Maria de Itabira.

O projeto florestal tem área total de 909,20 ha, entre áreas de plantio florestal, reservas ambientais (áreas de preservação permanente e reserva legal), benfeitorias, estradas, aceiros e uma lagoa. Tem 16 talhões, totalizando uma área de 416,50 ha de plantações clonais de *Eucalyptus* sp., todos em idade de corte (entre 6 e 7 anos) e 3,86 ha de área de *Eucalyptus* sp., destinados ao setor de pesquisa e desenvolvimento da empresa (Figura 3).

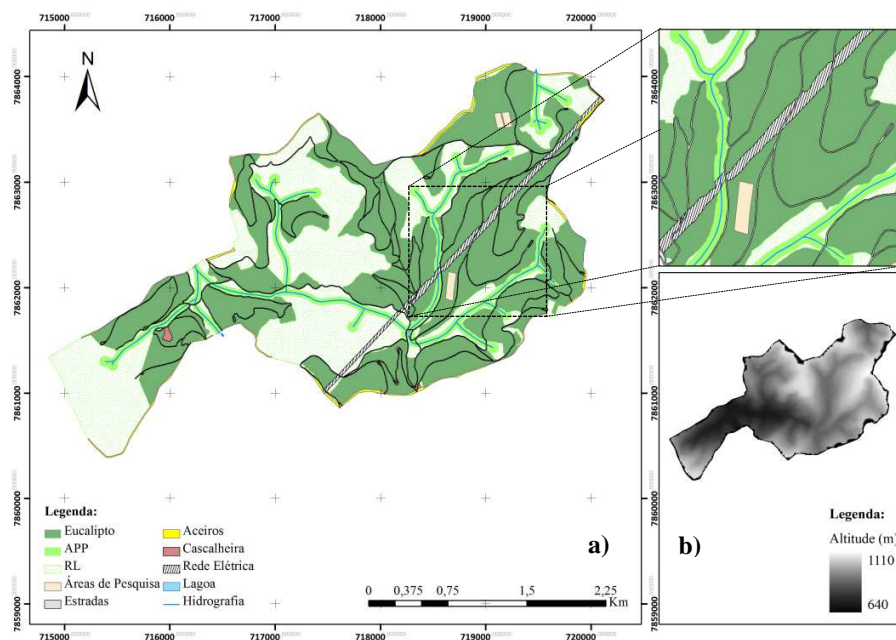


Figura 3 Mapa do projeto florestal discriminado, evidenciando a classificação quanto ao uso do solo (a) e elevação (b).

#### 4.2 Descrição técnica do problema abordado no estudo

O problema a ser resolvido enquadra-se no planejamento da colheita florestal em curto prazo, dentro de um nível hierárquico operacional, sendo a marcação dos eitos de trabalho das máquinas e a definição do sentido de

extração e dos locais para empilhamento de madeira tópicos frequentemente citados na empresa dentre os principais problemas da colheita florestal. Um dos principais objetivos nesta fase do planejamento é a geração de mapas temáticos para orientação das operações em campo, a qual deve buscar aliar conceitos de viabilidade técnica, ambiental e redução de custos.

A metodologia de confecção de mapas de microplanejamento para a colheita florestal é um processo minucioso, envolvendo um trabalho manual cuidadoso. O processo (Figura 4) inicia-se com o conhecimento das áreas destinadas ao corte e suas respectivas produções volumétricas, informações estas obtidas do inventário florestal e do planejamento tático da empresa.

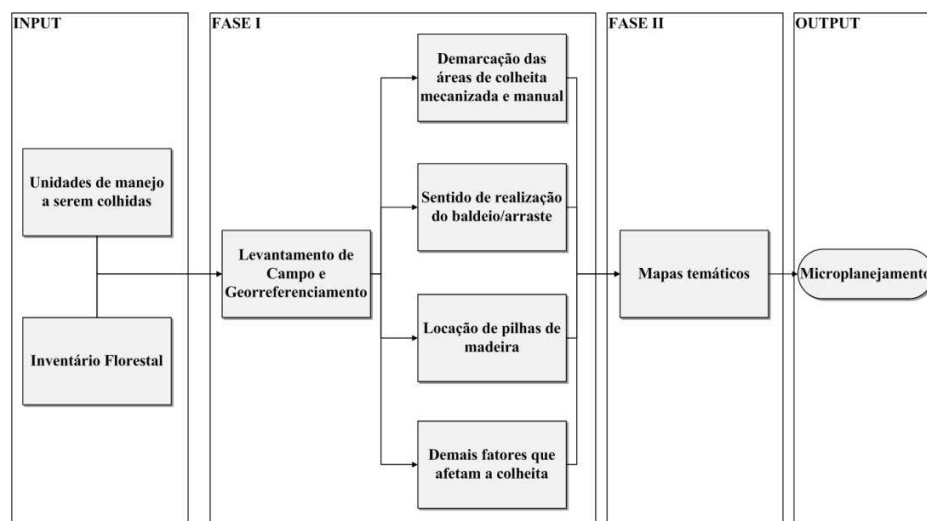


Figura 4 Fluxograma das fases do microplanejamento da colheita florestal – produção de mapas.

Em uma primeira fase é realizado um levantamento de campo para identificação e georreferenciamento das áreas que têm restrição à mecanização. Assim, equipes de campo são designadas para realizar um reconhecimento dos talhões destinados ao corte. A mesma é responsável por:

- a) Definir e demarcar áreas destinadas à utilização de cada opção de sistema de colheita (mecanizado, manual e semimecanizado);
- b) Definir geograficamente o ponto inicial de trabalho de cada frente de corte no talhão, bem como a área de execução de cada uma delas;
- c) Definir sentido de baldeio ou arraste das toras colhidas e locais de armazenamento das mesmas (pilhas de estocagem);
- d) Localizar possível presença de limitações à atividade de colheita florestal nos talhões, como a presença de buracos, barrancos, bueiros, locais de formação de poças d'água e presença de tocos altos, entre outros. Todos esses fatores devem ser georreferenciados sempre que possível.

O passo seguinte é a definição do sistema de colheita a ser adotado, o qual depende de aspectos ambientais, técnicos e econômicos. A utilização de um sistema de colheita mecanizado, por exemplo, apresenta limitações relacionadas à declividade do terreno, à época do ano, ao tipo de solo, bem como à disponibilidade e às limitações de ação dos próprios equipamentos. Portanto, a definição de compartimentos de colheita florestal inicia-se nesse momento, com a seleção de áreas de colheita mecanizada e não mecanizada. A demarcação dos eitos de colheita (estratificação espacial) leva em conta todos os itens mencionados anteriormente, cujo propósito é facilitar as operações em campo a um menor custo possível.

O motivo desses cuidados preliminares é reduzir a intensa movimentação de máquinas, durante a etapa de corte e baldeio, sem prejudicar a operação e evitando deslocamentos desnecessários. Portanto, um bom planejamento e execução desse procedimento podem garantir um melhor controle final da atividade. Além disso, geram benefícios ambientais, como

redução da compactação do solo em trechos específicos, podendo refletir na produtividade do próximo ciclo de rotação, principalmente em sistemas silviculturais envolvendo a talhadia.

Após o corte e o seccionamento das árvores, as toras resultantes são empilhadas em feixes dentro dos talhões pelos próprios equipamentos que realizam o corte. Esses feixes são levados até as margens dos talhões, ou seja, locais próximos às estradas, por meio das operações de arraste (quando as toras são arrastadas até os locais de empilhamento) ou baldeio (quando as toras são carregadas até os locais de empilhamentos pelas máquinas de baldeio). Os conjuntos de feixes de toras de madeira ficam empilhados nesses locais e formam grandes pilhas de madeira (Figura 5). A dimensão destas pilhas tem recomendações técnicas. Portanto, o sentido do baldeio e os locais de empilhamento de madeira devem ser definidos, de forma a se reduzir o esforço das máquinas durante o carregamento das toras.



Figura 5 Ilustração da formação de pilhas de toras de madeira nas divisas entre os talhões e as estradas, na empresa estudada. Fonte: Pereira-Filho, 2012.<sup>1</sup>

A segunda fase compreende a produção dos mapas de microplanejamento propriamente ditos, utilizados para nortear as atividades de

---

<sup>1</sup> PEREIRA-FILHO, G. M. **Madeiras**. Lavras, 2012. Foto.

campo. Nesta etapa são marcados os eitos de trabalho para a colheita, o sentido de ocorrência do baldeio ou arraste e a locação das pilhas para armazenar as toras nas margens das estradas, para que, posteriormente, sejam carregadas até os pátios da fábrica. Tudo isso é realizado de maneira visual, podendo ou não ser apoiado em ferramentas de sistemas de informação geográficas para melhor definição.

Assim, a metodologia utilizada para delimitar os eitos de trabalho na colheita florestal, bem como a definição dos locais para o empilhamento de madeira e seu sentido de baldeio, pode ser realizada de duas formas, o método tradicional e o método proposto.

#### **4.2.1 Método tradicional**

O método tradicional consiste no levantamento de campo mencionado anteriormente, somado à utilização de softwares de confecção de mapas, como, por exemplo, o AutoCAD® e o ArcGIS®. Logo, a definição dos eitos, sentido de baldeio/arraste e locais de empilhamento, é realizada utilizando-se a experiência dos técnicos envolvidos na colheita florestal. No entanto, os mesmos não aplicam nenhuma metodologia científica nesse processo, o que os tornam altamente empíricos e subjetivos nas organizações de modo geral, não sendo o objetivo de comparação no presente estudo. Esta subjetividade ocorre, em grande parte, devido ao grande volume de informações gerado, aliado à complexidade das operações, o que dificulta o processo.

O foco principal do planejamento está nas operações de campo, em que uma atenção reduzida é dada à etapa de planejamento do baldeio/arraste das toras e definição dos locais para empilhamento de madeira, mesmo admitindo a alta complexidade que estas operações podem assumir e a elevada participação nos custos da colheita.

#### 4.2.2 Método proposto

A proposta metodológica de resolução baseia-se na necessidade de minimizar a soma total do deslocamento das máquinas nas operações de corte e baldeio, ou seja, minimizar a distância percorrida entre os feixes de toras de madeira (produto resultante do corte das árvores) e as pilhas de armazenamento, para o posterior transporte até o seu destino final na empresa. Assim, propôs-se um método integrado de planejamento espacial das operações de corte e baldeio/arraste da atividade de colheita florestal, retratando exclusivamente a subdivisão otimizada do talhão para atuação das máquinas e equipes envolvidas. Os resultados gerados auxiliam a tomada de decisão quanto à definição dos eitos de trabalho da colheita florestal, bem como a alocação de pilhas de madeira e, com isso, eliminam a subjetividade no processo por meio da utilização de uma metodologia científica.

Devido à natureza do problema abordado, não se faz necessário especificar os tipos de equipamento, uma vez que não foram utilizadas informações de custos ou rendimentos, mas apenas a variável distância (metros).

O método consiste em utilizar as informações provenientes do levantamento de campo, unindo técnicas modernas de sistemas de informação geográfica e geoestatística como suporte aos modelos de programação linear inteira.

O modelo matemático retratado objetivou reduzir o somatório da distância entre os locais onde se encontram os feixes de toras (resultante do corte das árvores) até os locais de empilhamento de madeira, para, dessa forma, reduzir o deslocamento das máquinas. Simultaneamente, obtém-se a direção de escoamento da madeira (dos feixes para as pilhas). O mesmo envolve a utilização das seguintes restrições:



- a) Capacidade volumétrica de armazenamento de madeira nas pilhas;
- b) Número ótimo de pilhas a serem formadas;
- c) Restrições de agrupamento de pilhas.

Esta última visa agregar as unidades de pilhas para reduzir a dispersão das mesmas ao longo das margens das estradas e, assim, criar uma opção que reduza o esforço de coleta da madeira empilhada, durante a operação de transporte, até os pátios das fábricas.

Ao final do processamento, tem-se a obtenção das respostas necessárias à geração de um mapa temático de microplanejamento da atividade de colheita florestal, auxiliando no controle mais preciso das operações em campo.

### **4.3 Preparo da base de dados**

O preparo da base de dados compreende desde a etapa de organização dos dados até a obtenção das matrizes para modelagem do problema. Desse modo, para melhor entendimento, esta fase do trabalho foi dividida em: a) definição das unidades de trabalho, b) aspectos produtivos, c) aspectos geográficos e d) obtenção das matrizes dos coeficientes dos modelos.

#### **4.3.1 Seleção das unidades de trabalho**

Devido ao grande esforço de implementação e processamento computacional, optou-se por utilizar somente uma amostra dos talhões contidos no projeto florestal. Assim, dos 16 talhões aptos, somente 4 foram utilizados, número esse considerado suficiente para a validação da metodologia, já que se

buscou representar todas as variações topográficas e de área. Além disso, foram utilizados os seguintes critérios:

- a) Análise da distribuição espacial dos talhões, áreas de preservação permanente e reserva legal e malha de estradas presente;
- b) Levantamento de campo das áreas onde era possível a utilização de sistema de colheita mecanizado, semimecanizado e manual;
- c) Particularidades dos sistemas de colheita mecanizado e manual.

Uma característica do local é a presença de talhões irregulares e divididos por estradas em seu interior, o que é comum em áreas declivosas. Assim, cada talhão foi subdividido, quando necessário, em compartimentos (subtalhões), pois, tecnicamente, não se recomenda que a madeira colhida em uma fração do talhão atravesse a estrada para ser empilhada.

A partir das informações provenientes do levantamento de campo, houve a necessidade de classificar cada área em setores de colheita mecânica e semimecanizada/manual, pois cada sistema de colheita utiliza tamanhos específicos de toras, o que diferencia a capacidade e a dimensão das pilhas de madeira nas margens das estradas. Finalmente, obteve-se a seleção de 4 talhões e 29 setores utilizados no processamento, totalizando 70,5 ha (Tabela 1).

Tabela 1 Apresentação e definição das unidades de trabalho utilizadas no estudo.

| Setor        | Talhão | Subtalhão | Tipo de colheita | Área (m <sup>2</sup> ) | Volume (m <sup>3</sup> )* |
|--------------|--------|-----------|------------------|------------------------|---------------------------|
| 1            | 14     | 1         | CMa              | 10.949,35              | 34.336,00                 |
| 2            | 14     | 2         | CMa              | 10.983,89              | 29.830,00                 |
| 3            | 14     | 3         | CMa              | 23.417,34              | 97.965,00                 |
| 4            | 14     | 3         | CMe              | 64.996,38              | 369.694,00                |
| 5            | 14     | 4         | CMe              | 18.833,09              | 19.780,00                 |
| 6            | 14     | 5         | CMa              | 5.230,02               | 4.224,00                  |
| 7            | 14     | 5         | CMe              | 67.222,58              | 500.520,00                |
| 8            | 14     | 6         | CMa              | 4.272,14               | 4.290,00                  |
| 9            | 15     | 1         | CMa              | 8.291,80               | 3.712,00                  |
| 10           | 15     | 1         | CMe              | 15.518,24              | 17.460,00                 |
| 11           | 15     | 2         | CMa              | 6.667,93               | 7.821,00                  |
| 12           | 15     | 2         | CMe              | 4.834,86               | 12.150,00                 |
| 13           | 15     | 3         | CMa              | 90.377,92              | 574.152,00                |
| 14           | 15     | 3         | CMe              | 15.675,73              | 15.840,00                 |
| 15           | 18     | 1         | CMa              | 212,74                 | 440,00                    |
| 16           | 18     | 2         | CMa              | 5.947,35               | 2.784,00                  |
| 17           | 18     | 2         | CMe              | 61.556,86              | 138.294,00                |
| 18           | 18     | 3         | CMa              | 51.632,99              | 210.231,00                |
| 19           | 18     | 3         | CMe              | 20.634,63              | 41.184,00                 |
| 20           | 18     | 4         | CMe              | 14.298,31              | 32.220,00                 |
| 21           | 18     | 5         | CMa              | 21.707,90              | 95.776,00                 |
| 22           | 18     | 5         | CMe              | 40.179,45              | 176.967,00                |
| 23           | 18     | 6         | CMa              | 9.168,14               | 7.150,00                  |
| 24           | 18     | 6         | CMe              | 7.581,05               | 22.248,00                 |
| 25           | 19     | 1         | CMa              | 331,13                 | 975,00                    |
| 26           | 19     | 2         | CMa              | 24.856,72              | 89.712,00                 |
| 27           | 19     | 2         | CMe              | 31.825,52              | 77.859,00                 |
| 28           | 19     | 3         | CMa              | 31.233,71              | 122.598,00                |
| 29           | 19     | 3         | CMe              | 36.928,47              | 109.414,00                |
| <b>Total</b> |        |           |                  | <b>705.366,22</b>      | <b>2.819.626,00</b>       |

Em que CMa = setores de colheita manual; e CMe = setores de colheita mecanizada

#### 4.3.2 Aspectos produtivos

Nesta etapa do trabalho objetivou-se espacializar a variável volume (m<sup>3</sup>) usando a geoestatística por meio do método da Krigagem ordinária e, então, estimar com precisão a distribuição do volume nas áreas de estudo.

A partir das informações das parcelas permanentes, oriundas do inventário florestal contínuo, foi ajustado o semivariograma experimental para esta variável e, posteriormente, ajustou-se o modelo gaussiano ao semivariograma experimental. Utilizou-se a última medição de todas as parcelas permanentes do projeto, com o objetivo de melhorar as estimativas. Todos os ajustes e análises foram realizados no *software* R, versão 2.15.1 (R CORE TEAM, 2012).

O modelo gaussiano ajustado ao semivariograma tinha os seguintes parâmetros: contribuição, 1.796,73; alcance teórico, 417,38 m; alcance prático, 722,41 m; efeito pepita, 105,69 e patamar, 1.902,42. O mapa de Krigagem está disposto na Figura 6.

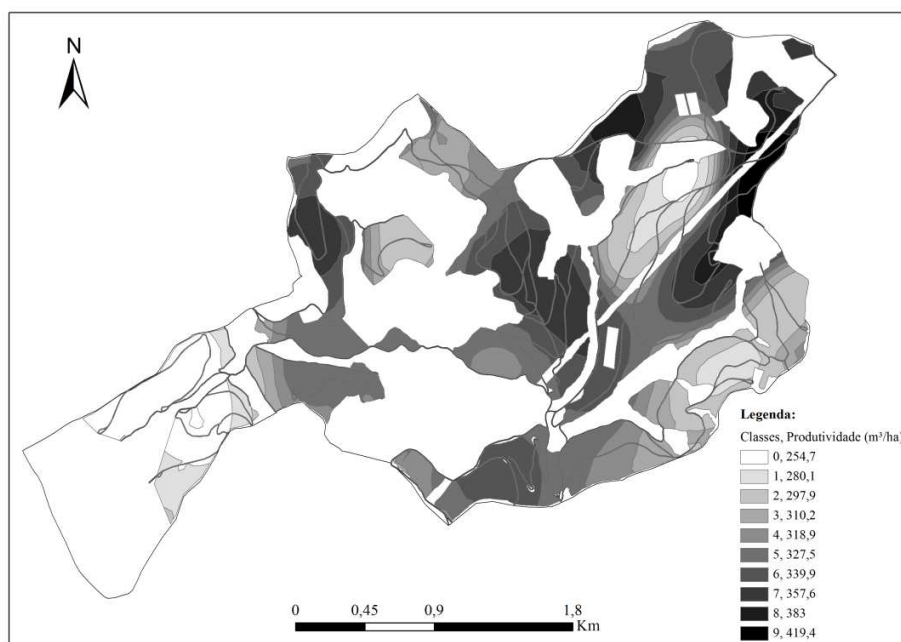


Figura 6 Mapa de Krigagem gerado para a variável volume ( $m^3$ ), no projeto florestal estudado.

### **4.3.3 Aspectos geográficos**

Os aspectos geográficos estão relacionados às diretrizes técnicas e ambientais de formação das unidades de pilha (UP) e das unidades de volume (UV).

#### **4.3.3.1 Unidades de pilha (UP)**

Uma unidade de pilha (UP) representa um compartimento de empilhamento de madeira com dimensão de 1,5 m de extensão por 4,5 m de altura e capacidade de armazenamento variável de acordo com a tora gerada pelo sistema de colheita.

As toras obtidas por meio de colheita mecanizada apresentam 6,0 m de comprimento. Então, cada UP destinada a receber toras originárias da colheita mecanizada assumiu as dimensões de 6,0 x 1,5 x 4,5 m, resultando em 40,50 St de capacidade de armazenamento. Já as toras obtidas por meio de colheita manual apresentavam 2,6 m de comprimento. Assim, cada UP destinada a receber toras da colheita manual tinha dimensões de 2,6 x 1,5 x 4,5 m, resultando em 17,55 St de capacidade.

Para conversão do volume de madeira empilhada (St) para metros cúbicos (m<sup>3</sup>), utilizou-se um fator de empilhamento de 1,80, para colheita mecanizada e 1,58, para colheita manual, resultando em um volume de 22,5 m<sup>3</sup> e 11,11 m<sup>3</sup> de madeira, respectivamente.

As pilhas de madeira devem ser localizadas às margens dos talhões, nas divisas com as estradas, para facilitar a operação de transporte. A definição dos

possíveis locais para empilhamento de madeira seguiu as seguintes recomendações técnicas:

- a) Declividade do terreno: recomenda-se o empilhamento de madeira em áreas planas, com declividade inferior a  $27^\circ$ , para que não ocorra empoçamento da água de chuva;
- b) Localização: as pilhas de madeira devem estar localizadas fora das reservas ambientais protegidas por lei, como áreas de preservação permanente (APP) e reserva legal (RL);
- c) Dimensões: não se recomenda a formação de pilhas com altura superior a 4,5 m, por questões de limitação dos equipamentos destinados ao carregamento dos caminhões para o transporte de madeira; não se recomenda a formação de longas pilhas de madeira e estas devem estar afastadas, pelo menos, 1,5 m entre si, para que o escoamento da água da chuva e a movimentação da fauna sejam promovidos.

O primeiro passo para a definição dos possíveis locais de empilhamento de madeira foi classificar o relevo em classes de altitude. Para isso, foi gerado um modelo de elevação digital (MDE) do terreno em formato *triangular irregular network*, ou TIN, usando como base as curvas de nível do local (cotas de altitude). Posteriormente, com base nesse modelo de elevação, foi realizada uma classificação da área em classes de inclinação (graus).

Após essa etapa, fez-se uma reclassificação do modelo de inclinação do relevo do solo gerado anteriormente em duas novas classes de inclinação (em graus), sendo:

- a) Classe 1: áreas com inclinação inferiores a  $27^\circ$ , mais planas, consideradas aptas para empilhamento de madeira; e

- b) Classe 2: áreas com inclinação superiores a  $27^\circ$ , consideradas inadequadas para empilhamento de madeira.

Nas áreas pertencentes à Classe 1 foram alocados pontos equidistantes em 1,5 m, cada um representando uma subunidade para empilhamento de madeira (UP). Na Figura 7 observa-se uma ilustração com os passos realizados para se chegar às UPs. Toda esta etapa foi desenvolvida em ambiente de sistema de informação geográfica (SIG), ArcGIS® versão 9.3.

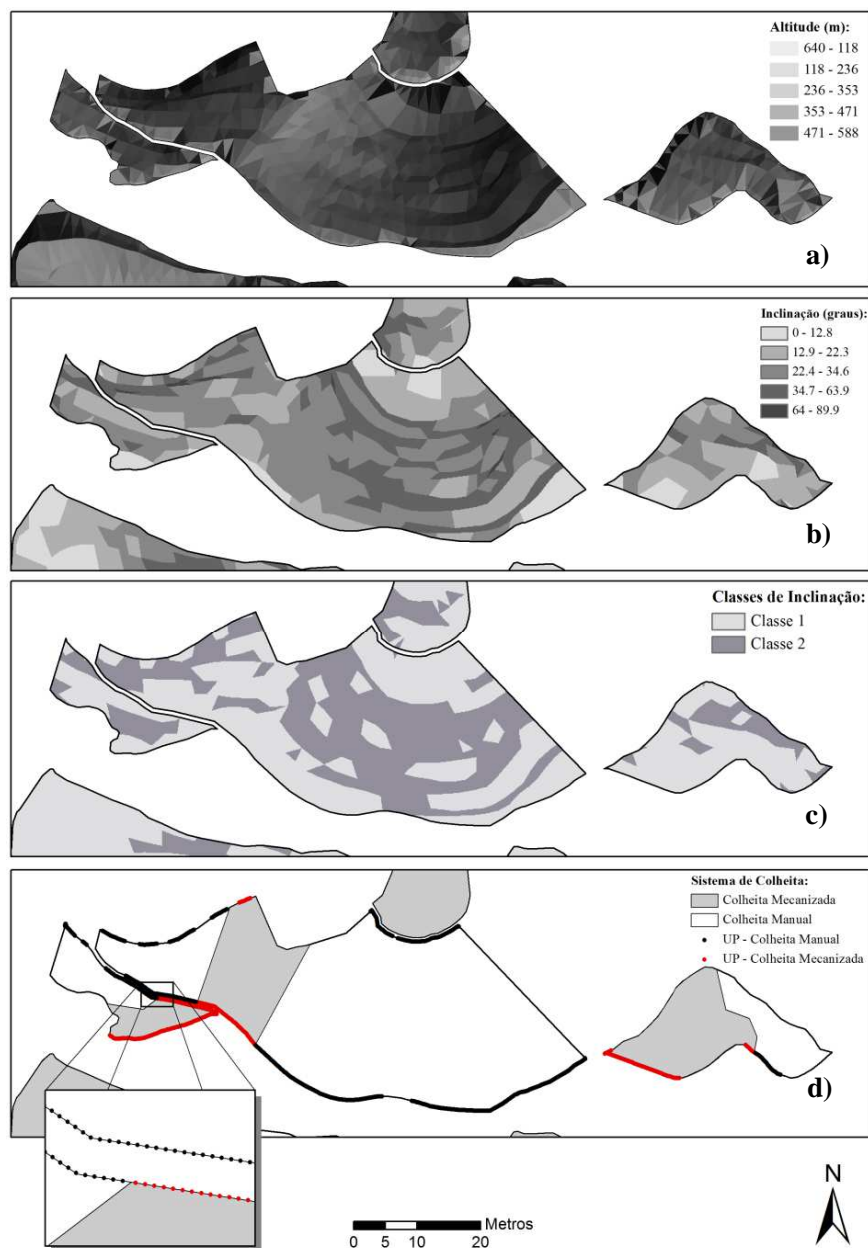


Figura 7. Classificação do relevo e formação das UPs, sendo: a) modelo de elevação digital gerado; b) modelo de inclinação (em graus) gerado; c) reclassificação do modelo de inclinação em áreas aptas (Classe 1) e não aptas (Classe 2) para estocagem de madeira e d) alocação das UPs nas áreas de Classe 1.



#### 4.3.3.2 Formação das unidades de volume (UV)

Definiu-se unidade de volume (UV) como sendo a fração em área do setor (subdivisão) que contém uma produção volumétrica ( $m^3$ ) delimitada por um polígono (grid) de dimensões 10 x 10 m ( $100 m^2$ ), quando possível, a ser transportado até as unidades de pilha (UP). Esta dimensão foi pré-definida em virtude das características do modelo matemático de programação linear inteira, o qual impede o fracionamento da UV, devido a uma produção volumétrica superior à capacidade da pilha. Em outras palavras, para que o modelo matemático fosse factível, o volume de madeira de cada UV deveria ser menor do que a capacidade das pilhas (Figura 8).

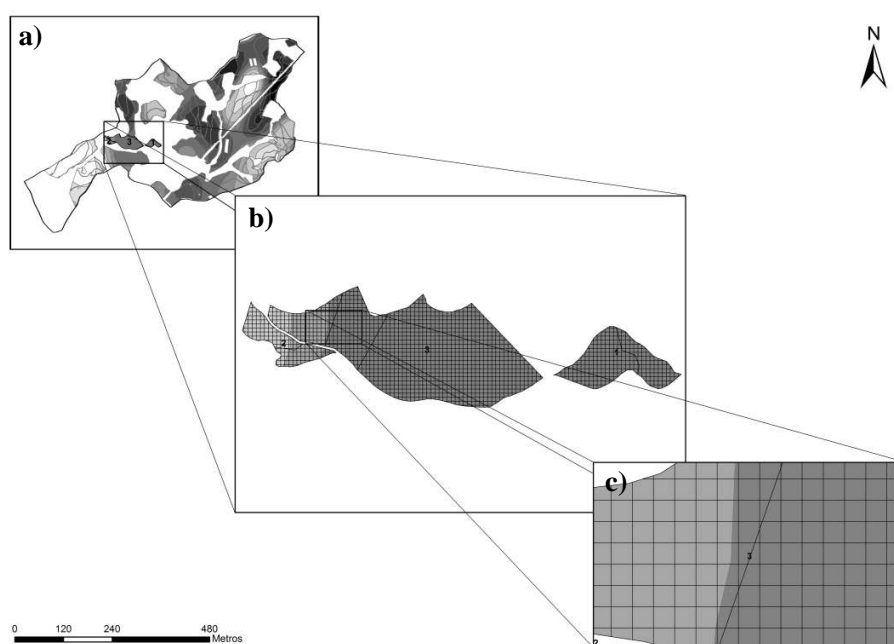


Figura 8 Exemplificação das unidades de volume (UV) geradas para as áreas do talhão 15, em que a) Krigagem da variável volume ( $m^3$ ); b) subdivisão de todo o talhão usando uma grid de dimensões 10 x10 m e c) detalhe da UV.

O cálculo do volume total de madeira, para cada UV, foi realizado utilizando-se como base o mapa de Krigagem gerado anteriormente. Calculou-se o volume total de cada UV multiplicando-se o valor referente ao centro de classe ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) ao qual ela pertencia pela área da mesma (em ha). Assim, se, em uma mesma UV, existisse mais de uma classe volumétrica, o volume seria ponderado de acordo com a área delimitada por cada uma delas, fato comumente observado.

Para finalizar esta etapa, foram definidos centroides (pontos) em cada UV para a realização do cálculo da distância euclidiana, ou seja, da distância em linha reta entre cada UV e as UPs.

#### 4.3.4 Obtenção das matrizes dos coeficientes dos modelos

Um modelo matemático de programação linear é composto por uma matriz tecnológica e vetores relacionados ao *Right Hand Side*, ou RHS, e à função objetivo. Assim, uma série de matrizes e vetores foi gerada, para dar suporte aos modelos testados, sendo:

- a) Vetor de volume das UVs ( $V_i$ ) – vetores de dimensão  $i$ , compostos dos valores dos somatórios dos volumes ( $\text{m}^3$ ) de cada UV <sub>$i$</sub> ;
- b) Vetor de capacidade de empilhamento das UPs ( $V_j$ ) - vetores de dimensão  $j$ , compostos pelos valores referentes às especificações de capacidades de empilhamento ( $\text{m}^3$ ) de cada UP <sub>$j$</sub> , para os  $n$  setores de colheita mecanizada e não mecanizada;
- c) Matriz de distância euclidiana entre as UVs e as UPs ( $C_{ij}$ ) – indica uma matriz com dimensões  $i \times j$ , formada pela distância euclidiana (em linha reta), em metros;
- d) Matriz de vizinhança entre as UPs ( $a_{ij}$ ) - a matriz de vizinhança é uma das matrizes necessárias na restrição de agrupamento, apresentada na

secção 4.4 deste estudo. Consideram-se vizinhas as UPs separadas entre si por, no máximo, 1,50 m. Constitui-se em uma matriz binária  $\{0,1\}$  de dimensões  $j \times j$ , sendo  $j$  é igual ao número total de UPs. Nesta matriz, os valores iguais a 1 indicam a vizinhança entre UPs e 0, a não vizinhança. No entanto, a diagonal desta matriz é composta por valores de -1 (um negativo) para que o vértice inicial  $k$  avaliado do grafo seja identificado;

- e) Vetor número de vizinhos ( $NV_j$ ) - este vetor contém o somatório do número de vizinhos para cada  $UP_j$  e dimensão  $j$ , equivalente ao número de UPs presentes em cada setor;
- f) Vetor de presença de vizinhos ( $PV_j$ ) - trata-se de um vetor binário  $\{0,1\}$ , com dimensão equivalente ao número de UPs, em que a presença de vizinhos é indicada pelo número 1 (um) e a ausência, pelo 0 (zero).

#### 4.4 Modelagem matemática

Nesta etapa, formularam-se seis modelos matemáticos de programação linear inteira, com o objetivo de minimizar o somatório do deslocamento das UVs para as UPs, respeitando-se restrições volumétricas, de capacidade de armazenamento das pilhas, número de UPs selecionadas e vizinhança entre elas.

Ao todo, foram testados seis modelos para a resolução do problema, sendo quatro deles variações do problema da P-mediana (*P-facility* ou, ainda, *Facility location*) e P-mediana capacitado, problemas clássicos e conhecidos na pesquisa operacional, de origem combinatória.

A variável de decisão utilizada é do tipo binária  $\{0,1\}$ , que representa a destinação ou não do volume da  $UV_i$  à  $UP_j$ , em sua totalidade. Esse tipo de variável foi utilizada, pois, se uma variável  $X_{ij}$  é ativada  $\{1\}$ , a mesma destinará, na totalidade, o seu volume contido na  $UV_i$  para ser empilhado na  $UP_j$ .

O processo de modelagem iniciou-se com a formulação original do problema das P-medianas, conforme encontrado em Arenales et. al (2007), em que a expressão (1) representa a função objetivo do modelo para minimizar o somatório do deslocamento dentro do talhão, ou seja, o somatório da distância euclidiana (m) entre as UVs e as UPs; (2) restrição de seleção das UVs a serem direcionadas exclusivamente a uma única pilha de estocagem, obrigando a seleção de, ao menos, uma destinação para cada UV; (3) restrição de conexão entre as variáveis de decisão do modelo; (4) restrição que define o número de UPs a serem selecionadas e (5) restrição binária do modelo de programação linear inteira.

Função objetivo

$$\text{MIN } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^M X_{ij} = 1, \forall_i \quad (2)$$

$$X_{ij} \leq Y_j, \forall_i, \forall_j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^M Y_j = NP, \forall_j \quad (4)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, Y_i \in \{0, 1\}, \forall_i, \forall_j \quad (5)$$

Em que

$X_{ij}$  = variável de decisão binária  $\{0, 1\}$  empregada para deslocar a  $UV_i$  para a  $UP_j$ ;

$Y_j$  = variável de decisão binária  $\{0, 1\}$  para ativar a  $UP_j$ ;

$C_{ij}$  = deslocamento, em metros (distância euclidiana), entre a  $UV_i$  e a  $UP_j$ ;

$$NP = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V_j} + 1, \forall_j \quad (6)$$

O conjunto de restrições 4 pode se tornar muito restritivo ao modelo, caso o somatório do volume das UVs de um determinado setor seja muito próximo à capacidade volumétrica de empilhamento das UPs selecionadas, reduzindo o número de combinações possíveis, podendo tornar o problema infactível. Assim, foi realizada uma alteração no modelo base para que isso fosse solucionado, por meio da adição de uma unidade ao cálculo da necessidade de UPs (NP) (6).

Esta formulação não leva em consideração a capacidade volumétrica de armazenamento de cada pilha (problema não capacitado). Então, foi necessário inserir uma nova restrição (7) para atendê-la e não ultrapassar o limite máximo volumétrico. Assim, o modelo base (não capacitado) mencionado anteriormente torna-se capacitado. Esse limite, quando não obedecido, cria a possibilidade de formação de pilhas com grande volume, podendo provocar acidentes no campo, bem como prejudicar ou impedir a realização da operação, já que cada equipamento apresenta limites operacionais de funcionamento.

$$\sum_{i=1}^n V_i X_{ij} \leq V_j, \forall_j \quad (7)$$

Em que

$V_i$  = volume total de madeira ( $m^3$ ) presente na  $i$ -ésima unidade volumétrica (UV<sub>*i*</sub>);

$V_j$  = capacidade total de armazenamento de madeira ( $m^3$ ) da  $j$ -ésima unidade de pilha (UP<sub>*j*</sub>).

Por outro lado, para evitar a subutilização de uma pilha habilitada, foi proposta a introdução da restrição (8), na qual se definiu um volume mínimo de armazenamento de madeira (m<sup>3</sup>). Contudo, para o seu funcionamento, fez-se necessário associar ao coeficiente do RHS desta restrição a variável de decisão  $Y_j$ , pois nem todas as pilhas são habilitadas e, sem esse artifício matemático na formulação, o problema seria infactível.

$$\sum_{i=1}^n V_i X_{ij} \geq V_j Y_j, \forall_j \quad (8)$$

Apenas com o uso das restrições (7) e (8), em substituição à restrição (4) no modelo matemático, pode-se determinar o número ótimo de UPs necessárias para estocagem da madeira dos talhões, sem que seja necessário defini-lo previamente.

Buscando-se evitar a dispersão das UPs na área e a formação de pequenas pilhas de estocagem de madeira, propôs-se o desenvolvimento da restrição (9), que tem como objetivo reduzir a distância entre as UPs selecionadas e formar pilhas de madeira de maior extensão. Assim, gera-se um cenário mais favorável às operações de transporte em detrimento do baldeio, o qual poderá ser trabalhado de acordo com a necessidade do momento na empresa. Esta restrição utiliza um artifício comum nos problemas de programação matemática, ou seja, a introdução de penalidades na função objetivo, caso não sejam selecionadas UPs vizinhas.

$$\sum_{j=1}^n a_{kj} Y_j + w_k \geq PV_k (NV_k - 1), \forall_k \quad (9)$$

Em que

$a_{jk}$  = matriz de vizinhança entre as UPs, de variáveis binárias com  $j$  linhas e  $k$  colunas;

$W_k$  = variável de decisão inteira binária  $\{0, 1\}$  utilizada para definir o número de vizinhos não ativos da pilha  $k$  e, assim, ativar a penalidade  $k$  na função objetivo;

$PV_k$  = matriz coluna indicando a presença (1) ou ausência (0) de UPs vizinhas;

$NV_k$  = vetor contendo o número de vizinhos de cada  $UP_j$ .

Para ilustrar o funcionamento da restrição de agrupamento (9), considere um talhão composto por 8 unidades UV, que possam ser armazenadas em 6 possíveis UPs, conforme exemplificado na Figura 9.

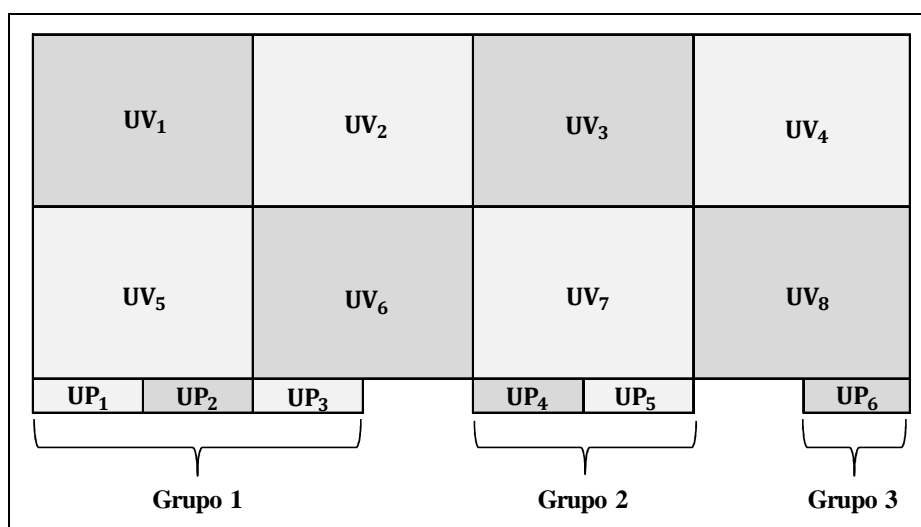


Figura 9 Exemplo ilustrativo do funcionamento da restrição de agrupamento (9).

Como se observa na Figura 9, os grupos 1 e 2 têm UPs vizinhas. O mesmo não ocorre com o grupo 3. Dessa forma, têm-se as seguintes matrizes:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad PV_j = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad e \quad NV_j = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Substituindo-se os valores apresentados nos vetores e na matriz na equação (9), obtém-se um conjunto de restrições, conforme observado a seguir.

$$\sum_{j=1}^n a_{kj} Y_j + w_k \geq PV_k (NV_k - 1) \quad , \text{ sendo}$$

$$(k=1): \quad -1.Y_1 + 1.Y_2 + 0.Y_3 + 0.Y_4 + 0.Y_5 + 0.Y_6 + w_1 \geq 1(1-1)$$

$$(k=2): \quad 1.Y_1 - 1.Y_2 + 1.Y_3 + 0.Y_4 + 0.Y_5 + 0.Y_6 + w_2 \geq 1(2-1)$$

$$(k=3): \quad 0Y_1 + 1Y_2 - 1Y_3 + 0Y_4 + 0Y_5 + 0Y_6 + w_3 \geq 1(1-1)$$

$$(k=4): \quad 0Y_1 + 0Y_2 + 0Y_3 - 1Y_4 + 1Y_5 + 0Y_6 + w_4 \geq 1(1-1)$$

$$(k=5): \quad 0Y_1 + 0Y_2 + 0Y_3 + 1Y_4 - 1Y_5 + 0Y_6 + w_5 \geq 1(1-1)$$

$$(k=6): \quad 0Y_1 + 0Y_2 + 0Y_3 + 0Y_4 + 0Y_5 - 1Y_6 + w_6 \geq 0(0-1)$$

Agora, considere as seguintes situações:

- a) Todas as UPs foram selecionadas para armazenar a madeira das UVs.

Quando não houver nenhuma restrição definindo o número de UPs a serem selecionadas (como a restrição 4) ou nenhuma restrição volumétrica (como as restrições 7 e 8), pode ser gerado um cenário em que todas as UPs



serão selecionadas para armazenar madeira, uma vez que a função objetivo visa minimizar a distância de deslocamento.

Assim, todos os valores de  $Y_j$  apresentaram resultado igual a 1 e somente uma penalidade ( $w_6$ ) será aplicada. Então,

$$(k=1): \quad -1.1+1.1+0.1+0.1+0.1+0.1+w_1 \geq 0 \quad \therefore \quad w_1 = 0$$

$$(k=2): \quad 1.1-1.1+1.1+0.1+0.1+0.1+w_2 \geq 1 \quad \therefore \quad w_2 = 0$$

$$(k=3): \quad 0.1+1.1-1.1+0.1+0.1+0.1+w_3 \geq 0 \quad \therefore \quad w_3 = 0$$

$$(k=4): \quad 0.1+0.1+0.1-1.1+1.1+0.1+w_4 \geq 0 \quad \therefore \quad w_4 = 0$$

$$(k=5): \quad 0.1+0.1+0.1+1.1-1.1+0.1+w_5 \geq 0 \quad \therefore \quad w_5 = 0$$

$$(k=6): \quad 0.1+0.1+0.1+0.1+0.1-1.1+w_6 \geq 0 \quad \therefore \quad w_6 = 1$$

Como se pode observar, a única penalidade aplicada ao modelo será relacionada à  $UP_6$ . Esse comportamento é desejado, uma vez que a  $UP_6$  encontra-se isolada das demais e a restrição formulada favorece a formação de pilhas mais longas por meio da junção de UPs.

b) Seleção de duas UPs para armazenar a madeira das UVs

Suponha-se que o modelo escolhesse somente a  $UP_2$  e a  $UP_3$  ( $Y_2=1$ ,  $Y_3=1$ ). Assim, teríamos o seguinte comportamento:

$$(k=1): \quad -1.0+1.1+1.1+1.0+1.0+1.0+w_1 \geq 0 \quad \therefore \quad w_1 = 0$$

$$(k=2): \quad 1.0-1.1+1.1+0.0+0.0+0.0+w_2 \geq 1 \quad \therefore \quad w_2 = 1$$

$$(k=3): \quad 0.0+1.1-1.1+0+0+0+w_3 \geq 0 \quad \therefore \quad w_3 = 0$$

$$(k=4): \quad 0.0+0.1+0.1-1.0+1.0+0.0+w_4 \geq 0 \quad \therefore \quad w_4 = 0$$

$$(k=5): \quad 0.0+0.1+0.1+1.0-1.0+0.0+w_5 \geq 0 \quad \therefore \quad w_5 = 0$$

$$(k=6): \quad 0.0+0.1+0.1+0.0+0.0-1.0+w_6 \geq 0 \quad \therefore \quad w_6 = 0$$

Nesta situação, o modelo aplicará o valor referente a uma penalidade ( $w_2=1$ ) no grupo 1 e nenhuma penalidade aos demais grupos e, conseqüentemente, isso acarretará um aumento no valor da função objetivo. Para  $k=3$  não haverá penalidade, pois todos os vizinhos da  $UP_3$  foram ativados.

Portanto, fica evidente que o modelo deverá buscar a melhor combinação, dentre as possibilidades existentes, para reduzir o número de penalidades a serem aplicadas à função objetivo. Resumidamente, a solução do problema irá buscar combinações que gerem grupos de unidades de pilhas, quando possível.

Não se recomenda a utilização desta restrição em situações em que somente uma UP é necessária para armazenamento das UVs, pois tornará o modelo infactível. Esse comportamento é esperado, uma vez que, se não há necessidade de duas ou mais UPs, então, conseqüentemente, não há necessidade de agrupá-las.

Após as modificações realizadas no modelo base, tem-se o surgimento de um modelo adaptado às questões técnicas do microplanejamento. Contudo, uma última transformação se fez necessária na função objetivo (1), passando a assumir a forma descrita na equação (10).

$$\text{Função objetivo} \quad (10)$$

$$\text{MIN } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} + A \sum_{k=1}^m W_k$$

em que

A = penalidade da função objetivo;

$C_{ij}$ ,  $X_{ij}$  e  $W_k$  = definidos anteriormente.

A penalidade (A) pode assumir quaisquer valores maiores que 0 (zero). Nesse estudo adotou-se, como forma de padronização, o somatório das distâncias entre as UVs e as UPs.

Ao final do processo de modelagem, foram gerados seis modelos. Na Tabela 2 apresenta-se um sumário dos modelos gerados, indicando as equações que foram utilizadas para a formulação de cada um de seus modelos.

Tabela 2 Especificações dos modelos avaliados para a resolução do problema envolvendo a estratificação espacial do talhão na colheita florestal.

| <b>Modelo</b> | <b>Especificação</b> | <b>Equações presentes no modelo</b> |
|---------------|----------------------|-------------------------------------|
| 1             | Base não capacitado  | 1, 2, 3, 4 e 5                      |
| 2             | Base capacitado      | 1, 2, 3, 4, 5 e 7                   |
| 3             | Variação 1           | 10, 2, 3, 4, 5 e 9                  |
| 4             | Variação 2           | 1, 2, 3, 5, 7 e 8                   |
| 5             | Variação 3           | 10, 2, 3, 4, 5, 7 e 9               |
| 6             | Variação 4           | 10, 2, 3, 5, 7, 8 e 9               |

Foi utilizado um valor referente a 80% da capacidade volumétrica máxima de armazenamento das UPs para a definição do limite mínimo de armazenamento de cada UP.

Os modelos avaliados constituíram-se dos modelos 1, base e modelo 2, base capacitado, bem como quatro variações, sendo

- a) Variação 1: variação do modelo base, não capacitado, que envolve a formação de pilhas mais próximas umas das outras, por meio da incorporação da restrição de agrupamento (9);
- b) Variação 2: trata-se do modelo base, excluindo-se a restrição (4) e inserindo-se o conjunto de restrições (7) e (8). Esse modelo cria uma alternativa à definição de um número fixo de unidades de volume (UP) selecionadas. Além disso, devido ao controle volumétrico mínimo (80%) e máximo (100%) da capacidade de armazenamento da UP, tende a formar pilhas com volume mais uniforme. A utilização destas restrições pode ser considerada uma adaptação das restrições de limites volumétricos de exploração da floresta comumente empregados nos modelos de regulação florestal, como a formulação clássica do modelo tipo I encontrado em Johnson e Scheurman (1977);
- c) Variação 3: esta variação introduz ao modelo base capacitado a restrição de agrupamento (9), proposta neste trabalho. Como resultado, esse modelo fixa o número de UPs a serem selecionadas, mas força a formação de pilhas contíguas, por meio da seleção de UPs vizinhas;
- d) Variação 4: nesse modelo houve a introdução da restrição de agrupamento (9) à variação 2. Assim, ele não fixa o número de UPs a serem selecionadas, mas regula o volume de madeira nas pilhas formadas e, ainda, força a formação de pilhas contíguas, por meio da seleção de UPs vizinhas.

#### **4.4.1 Implementação computacional, geração e avaliação dos cenários testados**

Os 6 modelos foram combinados entre os 29 setores, gerando, portanto, 174 cenários avaliados. Todos os cenários foram processados utilizando-se o

software LINGO (*Language for Interactive General Optimizer*) versão 13.0. O algoritmo utilizado foi o *Branch-and-bound*, por se tratar de variáveis inteiras binárias.

O *Branch-and-bound* trata-se de um algoritmo que trabalha em duas frentes, que são: a) em um primeiro momento ocorre a divisão (*branch*), em que a região factível é contraída na busca por soluções inteiras, porém, mantendo todas as possíveis soluções inteiras que o problema original apresentava e b) em um segundo momento ocorre a delimitação (*bound*), em que o algoritmo delimita, na região factível, as melhores soluções encontradas para o problema até o momento atual do processamento, memorizando-as (HILLIER; LIEBERMAN; HILLIER, 1990).

O processamento dos cenários foi realizado em um computador com processador Intel® Core™ i3-2100 de 3.10 MHz e 8 Gb de memória RAM, fixando-se um tempo limite de processamento de 2 horas, devido à natureza NP-difícil<sup>2</sup> do problema retratado. Além disso, avaliou-se o estado da solução, sendo

- a) Problema factível com solução ótima encontrada;
- b) Problema factível com solução aproximada encontrada;
- c) Nenhuma solução encontrada; e
- d) Problema infactível.

#### 4.4.2 Pós-processamento dos dados

Após a obtenção das soluções, foi necessário realizar um pós-processamento dos resultados, para a formação dos eitos e confecção dos mapas

---

<sup>2</sup> *NP-difícil*: sob a ótica da otimização, os problemas NP-difícil (do inglês *NP-hard*) são problemas que possuem ordem de complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema.

operacionais de colheita florestal nas áreas, ou seja, decodificação do resultado matemático.

Os eitos foram formados por meio da união das UVs que se destinavam à UPs agrupadas, em um intervalo inferior a 50 m umas das outras. Logo, houve a formação de grupos distintos de UPs que, por sua vez, se constituíram em um pátio para armazenamento de madeira. Na sequência, definiu-se o sentido do arraste/baldeio (variável de decisão ativa), a partir do conhecimento da destinação de um eito formado ao seu respectivo grupo de UPs.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Processamento dos modelos

Foram realizados 174 processamentos e um total de 182,89 horas envolvendo os seis modelos gerados. Os modelos que apresentaram o menor tempo total de processamento foram modelo 1, modelo 3, modelo 5, modelo 2, modelo 4 e modelo 6 (Tabela 3), nessa ordem.

Na Tabela 4 apresentam-se o número de variáveis de decisão e o número de restrições para cada um dos cenários avaliados. O número de variáveis de decisão variou de 400 a 573.588, para os modelos 1, 2 e 4, respectivamente. Já para os modelos 3, 5 e 6, esses valores variaram de 440 a 574.152 variáveis de decisão, devido à introdução da restrição de agrupamento nos modelos.

Em relação ao número de restrições, os valores variaram de 371 a 574.042, para o modelo 1; de 411 a 575.169, para o modelo 2; de 411 a 574.606, para o modelo 3; de 450 a 574.606, para o 4; de 451 a 575.170, para o 5 e de 490 a 575.733, para o modelo 6.

O modelo mais complexo, em termos de número de variáveis de decisão e de restrições, foi o 6, que envolve as restrições de capacidade volumétrica máxima (7), mínima (8) e de agrupamento (9) em um mesmo modelo, e o menos complexo foi o modelo 1.

O número de variáveis de decisão e de restrições dos modelos é determinado pelo número de UVs e de UPs de cada setor processado. Quanto menores as dimensões das unidades de volume, maior será o número de variáveis de decisão e restrições e, conseqüentemente, maior a complexidade do modelo.

Tabela 3 Valor da função objetivo (em metros) para os 29 setores do projeto florestal estudado, considerando-se os seis modelos de solução do problema.

| Setor        | Função objetivo (m)/modelo |          |           |          |           |          | Tempo (s)/modelo |         |       |         |         |         |
|--------------|----------------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|------------------|---------|-------|---------|---------|---------|
|              | 1                          | 2        | 3         | 4        | 5         | 6        | 1                | 2       | 3     | 4       | 5       | 6       |
| 1            | 2.155,9*                   | SN       | 2.545,0*  | 2.299,8  | SN        | 13.045,0 | 9                | 7.200   | 33    | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 2            | 4.114,2*                   | 4.377,1  | 4.808,0*  | 4.323,5  | 10.908,0  | 5.096,0  | 8                | 7.200   | 102   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 3            | 7.086,8*                   | SN       | 11.553,0* | 7.547,9  | SN        | SN       | 58               | 7.200   | 83    | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 4            | 37.237,7*                  | SN       | 42.604,0* | SN       | SN        | SN       | 797              | 7.200   | 898   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 5            | 11.177,1*                  | 11.275,9 | 11.413,0* | 11.280,2 | 11.613,0* | 12.184,0 | 6                | 7.200   | 10    | 7.200   | 102     | 7.200   |
| 6            | 2.648,9*                   | 2.820,2  | 2.842,0*  | 2.843,9  | 3.032,0*  | 3.590,0  | 1                | 7.200   | 2     | 7.200   | 101     | 7.200   |
| 7            | 23.699,1*                  | SN       | 25.260,0* | SN       | SN        | SN       | 1.271            | 7.200   | 1.572 | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 8            | 1.780,0*                   | 1.793,0* | 1.807,0*  | 1.806,1* | 1.792,0*  | 1.822,0  | 1                | 552     | 100   | 25      | 708     | 7.200   |
| 9            | 5.888,4*                   | 6.121,8  | 6.041,5*  | 6.120,8  | 6.325,0   | 6.208,0  | 1                | 7.200   | 1     | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 10           | 9.827,9*                   | 10.250,8 | 10.180,0* | 10.268,5 | 11.180,0* | 11.574,0 | 5                | 7.200   | 10    | 7.200   | 274     | 7.200   |
| 11           | 2.376,6*                   | 2.446,2* | 2.626,0*  | 2.438,5* | 6.332,0*  | 5.122,0* | 1                | 667     | 3     | 840     | 79      | 100     |
| 12           | 1.161,1*                   | 1.190,9* | 1.890,0*  | 1.228,3* | 2.390,0*  | 2.390,0  | 2                | 814     | 102   | 269     | 102     | 131     |
| 13           | 52.063,1*                  | SN       | 50.480,0* | SN       | SN        | SN       | 1.738            | 7.200   | 1.782 | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 14           | 9.468,0*                   | 9.538,4  | 9.576,0*  | 9.525,3  | 10.386,0* | 10.822,0 | 5                | 7.200   | 8     | 7.200   | 522     | 7.200   |
| 15           | 45,7*                      | 45,7*    | SN        | SN       | SN        | SN       | 0                | 0       | SI    | SI      | SI      | SI      |
| 16           | 3.434,9*                   | 3.637,6  | 4.146,0*  | 3.645,6  | 4.613,0*  | 4.800,0  | 0                | 7.200   | 1     | 7.200   | 100     | 7.200   |
| 17           | 81.944,9*                  | 96.258,3 | 82.326,0* | 83.324,2 | 101.285,0 | 93.572,0 | 146              | 7.200   | 164   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 18           | 32.385,8*                  | SN       | 32.750,0* | SN       | SN        | SN       | 271              | 7.200   | 288   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 19           | 10.618,9*                  | 11.030,0 | 18.000,0* | 10.925,1 | 16.024,0* | 22.192,0 | 15               | 7.200   | 24    | 7.200   | 371     | 7.200   |
| 20           | 5.138,5*                   | 5.201,4  | 5.572,0*  | 5.176,1  | 6.072,0*  | 15.272,0 | 4                | 7.200   | 32    | 7.200   | 925     | 7.200   |
| 21           | 8.346,6*                   | 32.544,5 | 11.072,0* | 9.125,0  | 32.358,0  | SN       | 49               | 7.200   | 105   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 22           | 15.722,2*                  | 84.790,1 | 41.238,0* | 16.083,6 | 59.914,0  | SN       | 171              | 7.200   | 187   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 23           | 3.215,1*                   | 3.284,5  | 3.890,0*  | 3.290,1  | 5.020,0*  | 5.422,0  | 1                | 7.200   | 2     | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 24           | 1.722,1*                   | 1.796,6  | 2.875,0*  | 1.817,8  | 4.675,0*  | 4.275,0  | 5                | 7.200   | 101   | 7.200   | 103     | 7.200   |
| 25           | 70,7*                      | 70,7*    | SI        | 165,8*   | SI        | SI       | 0                | 0       | SI    | 0       | SI      | SI      |
| 26           | 12.860,1*                  | SN       | 17.172,0* | 12.989,7 | -         | 25.936,0 | 47               | 7.200   | 111   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 27           | 20.748,7*                  | 27.227,2 | 21.058,0* | 20.878,2 | 39.224,0  | 27.058,0 | 43               | 7.200   | 67    | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 28           | 15.435,1*                  | SN       | 15.364,0* | 16.669,0 | SN        | 32.798,0 | 83               | 7.200   | 125   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| 29           | 17.334,2*                  | 71.889,1 | 23.560,0* | 17.677,7 | 78.600,0  | 33.800,0 | 83               | 7.200   | 117   | 7.200   | 7.200   | 7.200   |
| <b>TOTAL</b> |                            |          |           |          |           |          | 4.821            | 174.833 | 6.030 | 173.934 | 118.587 | 180.231 |

Em que: \* = solução ótima; SN = sem solução ao final de 2 horas de processamento; SI = infactível.



Tabela 4 Número de variáveis de decisão e restrições para os 29 setores do projeto florestal estudado, considerando-se os seis modelos testados.

| Setor | Número de variáveis de decisão/modelo |         |         |         |         |         | Número de restrições/modelo |         |         |         |         |         |
|-------|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | 1                                     | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 1                           | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
| 1     | 34.104                                | 34.104  | 34.336  | 34.104  | 34.336  | 34.336  | 34.020                      | 34.252  | 34.252  | 34.483  | 34.484  | 34.715  |
| 2     | 29.640                                | 29.640  | 29.830  | 29.640  | 29.830  | 29.830  | 29.607                      | 29.797  | 29.797  | 29.986  | 29.987  | 30.176  |
| 3     | 97.650                                | 97.650  | 97.965  | 97.650  | 97.965  | 97.965  | 97.646                      | 97.961  | 97.961  | 98.275  | 98.276  | 98.590  |
| 4     | 369.212                               | 369.212 | 369.694 | 369.212 | 369.694 | 369.694 | 369.497                     | 369.979 | 369.979 | 370.460 | 370.461 | 370.942 |
| 5     | 19.694                                | 19.694  | 19.780  | 19.694  | 19.780  | 19.780  | 19.838                      | 19.924  | 19.924  | 20.009  | 20.010  | 20.095  |
| 6     | 4.176                                 | 4.176   | 4.224   | 4.176   | 4.224   | 4.224   | 4.216                       | 4.264   | 4.264   | 4.311   | 4.312   | 4.359   |
| 7     | 499.875                               | 499.875 | 500.520 | 499.875 | 500.520 | 500.520 | 500.006                     | 500.651 | 500.651 | 501.295 | 501.296 | 501.940 |
| 8     | 4.224                                 | 4.224   | 4.290   | 4.224   | 4.290   | 4.290   | 4.223                       | 4.289   | 4.289   | 4.354   | 4.355   | 4.420   |
| 9     | 3.680                                 | 3.680   | 3.712   | 3.680   | 3.712   | 3.712   | 3.764                       | 3.796   | 3.796   | 3.827   | 3.828   | 3.859   |
| 10    | 17.370                                | 17.370  | 17.460  | 17.370  | 17.460  | 17.460  | 17.474                      | 17.564  | 17.564  | 17.653  | 17.654  | 17.743  |
| 11    | 7.742                                 | 7.742   | 7.821   | 7.742   | 7.821   | 7.821   | 7.762                       | 7.841   | 7.841   | 7.919   | 7.920   | 7.998   |
| 12    | 11.988                                | 11.988  | 12.150  | 11.988  | 12.150  | 12.150  | 11.901                      | 12.063  | 12.063  | 12.224  | 12.225  | 12.386  |
| 13    | 573.588                               | 573.588 | 574.152 | 573.588 | 574.152 | 574.152 | 574.042                     | 575.169 | 574.606 | 574.606 | 575.170 | 575.733 |
| 14    | 15.760                                | 15.760  | 15.840  | 15.760  | 15.840  | 15.840  | 15.878                      | 15.958  | 15.958  | 16.037  | 16.038  | 16.117  |
| 15    | 400                                   | 400     | 440     | 400     | 440     | 440     | 371                         | 411     | 411     | 450     | 451     | 490     |
| 16    | 2.752                                 | 2.752   | 2.784   | 2.752   | 2.784   | 2.784   | 2.807                       | 2.839   | 2.839   | 2.870   | 2.871   | 2.902   |
| 17    | 138.097                               | 138.097 | 138.294 | 138.097 | 138.294 | 138.294 | 138.602                     | 138.799 | 138.799 | 138.995 | 138.996 | 139.192 |
| 18    | 209.902                               | 209.902 | 210.231 | 209.902 | 210.231 | 210.231 | 210.212                     | 210.541 | 210.541 | 210.869 | 210.869 | 211.198 |
| 19    | 41.041                                | 41.041  | 41.184  | 41.041  | 41.184  | 41.184  | 41.186                      | 41.329  | 41.329  | 41.471  | 41.472  | 41.614  |
| 20    | 32.041                                | 32.041  | 32.220  | 32.041  | 32.220  | 32.220  | 32.042                      | 32.221  | 32.221  | 32.399  | 32.400  | 32.578  |
| 21    | 95.448                                | 95.448  | 95.776  | 95.448  | 95.776  | 95.776  | 95.412                      | 95.740  | 95.740  | 96.067  | 96.068  | 96.395  |
| 22    | 176.596                               | 176.596 | 176.967 | 176.596 | 176.967 | 176.967 | 176.702                     | 177.073 | 177.073 | 177.443 | 177.444 | 177.814 |
| 23    | 7.095                                 | 7.095   | 7.150   | 7.095   | 7.150   | 7.150   | 7.170                       | 7.225   | 7.225   | 7.279   | 7.280   | 7.334   |
| 24    | 22.042                                | 22.042  | 22.248  | 22.042  | 22.248  | 22.248  | 21.944                      | 22.150  | 22.150  | 22.355  | 22.356  | 22.561  |
| 25    | 900                                   | 900     | 975     | 900     | 975     | 975     | 838                         | 913     | 913     | 987     | 988     | 1.062   |
| 26    | 89.445                                | 89.445  | 89.712  | 89.445  | 89.712  | 89.712  | 89.514                      | 89.781  | 89.781  | 90.047  | 90.048  | 90.314  |
| 27    | 77.648                                | 77.648  | 77.859  | 77.648  | 77.859  | 77.859  | 77.806                      | 78.017  | 78.017  | 78.227  | 78.228  | 78.438  |
| 28    | 122.304                               | 122.304 | 122.598 | 122.304 | 122.598 | 122.598 | 122.427                     | 122.721 | 122.721 | 123.014 | 123.015 | 123.308 |
| 29    | 109.173                               | 109.173 | 109.414 | 109.173 | 109.414 | 109.414 | 109.386                     | 109.627 | 109.627 | 109.867 | 109.868 | 110.108 |

No entanto, no caso da utilização de métodos exatos de resolução, como a programação linear inteira, não se recomenda que sejam utilizadas UVs com dimensões muito pequenas, pois isso acarretaria um maior custo computacional e tempo de processamento. Por outro lado, a utilização de maiores dimensões das UVs ocasionaria perda da qualidade visual do mapa final, chegando a gerar soluções infactíveis, se o volume da UV for maior que o da UP.

Já o número de unidades de pilha pode ser controlado por meio da restrição de declividade imposta, durante a obtenção dos locais para instalação das possíveis UPs nos setores. Nesse trabalho, foi utilizado um limite de declividade de  $27^\circ$ . No entanto, como foram gerados muitos pontos, podia-se reduzir esse limite de declividade e, conseqüentemente, menos UPs seriam alocadas. Porém, como se trata de uma área de topografia muito irregular, poderiam surgir locais onde nenhum ponto seria alocado, impossibilitando a formação de locais para instalação de pilhas.

Em problemas de instalação de facilidades, como a P-mediana, é muito comum haver um grande número de variáveis de decisão e restrições nos modelos matemáticos, o que pode dificultar a solução do problema por meio de métodos exatos ou, até mesmo, inviabilizar a obtenção de soluções em tempo viável. Conforme mencionam Nascimento et al. (2012), problemas de PLI com grande número de variáveis de decisão tendem a elevar o tempo computacional por meio dos métodos exatos de otimização, o que os torna, muitas vezes, tecnicamente intratáveis, matematicamente.

O número de variáveis de decisão e de restrições influenciou significativamente o tempo de processamento, conforme pode ser observado nas Figuras 10 e 11. Analisando-se estas figuras, pode-se perceber que a adição de restrições para controlar o volume empilhado nas UPs foi o principal fator que corroborou para o aumento no tempo de processamento. Como pode ser observado, os modelos 1 e 3 (base e variação 1) não apresentaram problemas

relacionados ao tempo de processamento. Dentre os modelos que continham as restrições de controle volumétrico, pode-se observar uma ligeira vantagem dos que utilizaram a estratégia de controle volumétrico por meio de limites (modelos 4 e 6) em relação à estratégia de definição de um número fixo de UPs (modelos 2 e 5). Esse comportamento também pode ser observado analisando-se o tempo total de processamento, que apresentou um menor total, quando se utilizou a primeira estratégia em detrimento da segunda.

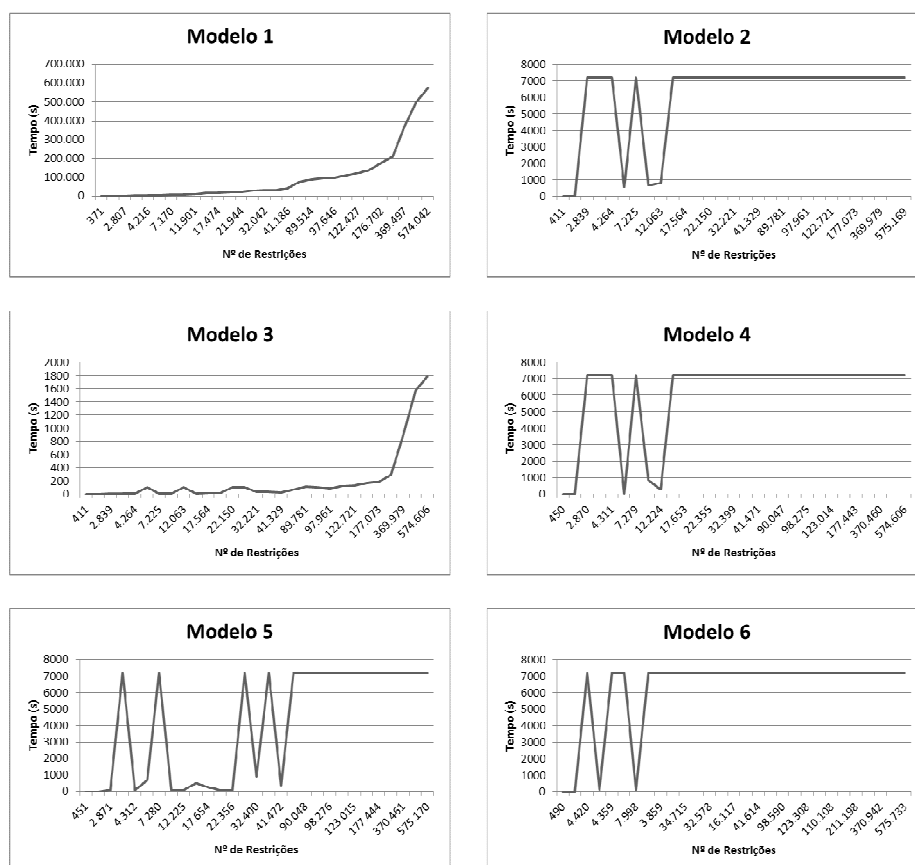


Figura 10 Gráficos do tempo de processamento (s) em função do número de restrições para cada modelo estudado.

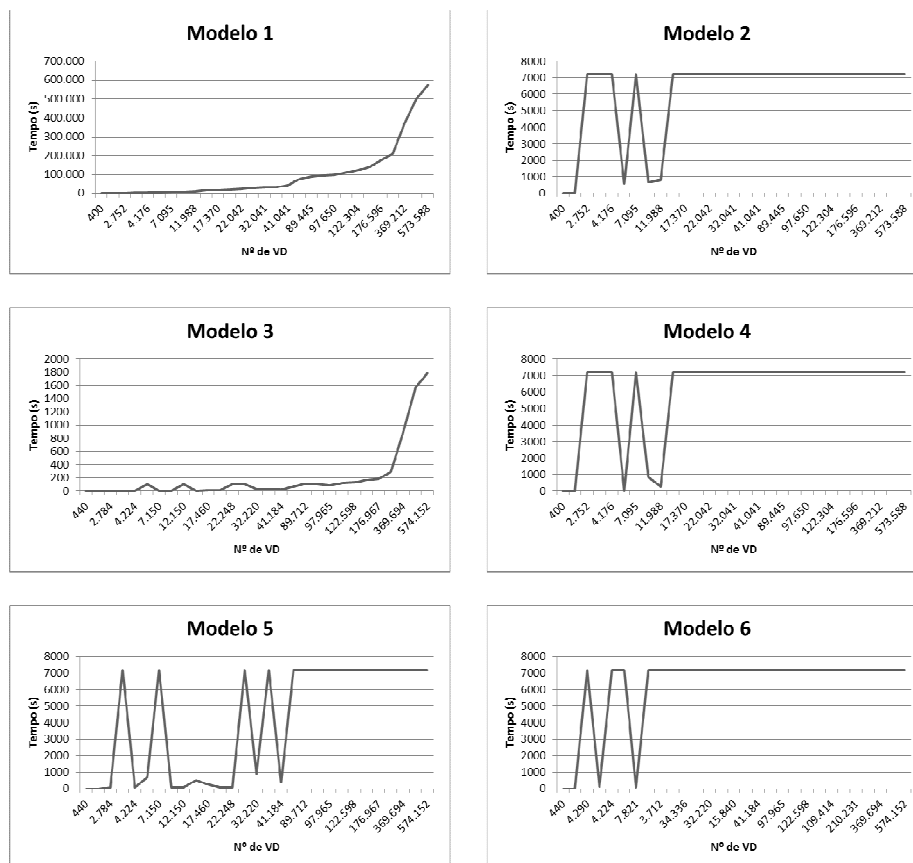


Figura 11 Gráficos do tempo de processamento (s) em função do número de variáveis de decisão para cada modelo estudado.

A programação linear inteira, envolvendo variáveis puramente binárias, corresponde a um caso específico de PLI, em que as variáveis devem assumir somente o valor 0 ou o 1. Nesse caso, o indicado para a obtenção da solução ótima é analisar as combinações possíveis por meio do uso de um algoritmo, como o *Branch-and-bound*. Mas, segundo Lachtermacher (2007), a busca exaustiva implicaria num esforço computacional demasiado e impraticável. O problema reside no fato de que a PLI com variáveis binárias só consegue ser

aplicada a problemas pequenos, pois o número de combinações possíveis de soluções cresce de forma exponencial, ou seja, de forma muito rápida.

O tempo elevado de processamento era esperado, pois, em muitos casos, os setores apresentaram grandes áreas, resultando em muitas variáveis de decisão. Isso poderia ser solucionado com a utilização de uma metodologia aproximativa de resolução, como heurísticas e metaheurísticas. Porém, os métodos heurísticos podem não garantir o ótimo, enquanto os algoritmos determinísticos proporcionam uma solução ótima. No entanto, a utilização das mesmas oferece uma solução aceitável para problemas de grande porte, a um baixo custo computacional (IGNÍZIO; CAVALIER, 1994).

Gomide (2009) avaliou a utilização das metaheurísticas *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético na solução de um problema de regulação florestal, envolvendo restrições de produção máxima e mínima, visando maximizar o VPL. Ele chegou à conclusão de que a utilização dessas metodologias economizou até 98,78% do tempo de processamento, quando comparadas à resolução por métodos exatos (PLI). Rodrigues et al. (2004) encontraram valores cerca de 95% do ótimo matemático, com um processamento até dez vezes mais rápido, quando comparado ao algoritmo exato de solução (*Branch-and-bound*).

Martinhago (2012), comparando a resolução do problema das P-mediana para a locação de pátios de estocagem de madeira em florestas tropicais por meio de métodos exatos (PLI binária) e heurísticas (HYDRID), aliadas a técnicas de sistemas de informações geográficas (SIG), encontrou valores muito próximos e, muitas vezes, iguais ao ótimo determinado pela PLI, apresentando um tempo muito menor de processamento.

Zhang, Johnson e Sutherland (2011) criaram uma metodologia alternativa à P-mediana para locação de instalações de produção de biocombustíveis a partir de biomassa de madeira, baseada em dois estágios. O

primeiro estágio é realizado em ambiente de sistemas de informação geográfica (SIG) e o segundo, em que se objetivou determinar a melhor localidade, por meio de um modelo matemático denominado modelo de custo total de transporte.

## 5.2 Qualidade da solução obtida

De modo geral, com exceção dos modelos 1 e 3, todos os demais modelos apresentaram um número alto de variáveis de decisão e de restrições, comprometendo não somente o tempo de processamento, como também a qualidade da solução dos mesmos, ou seja, sem atingir o ótimo global.

Assim, dos seis modelos avaliados, somente os modelos 1 e 2 apresentaram solução para todos os cenários. O modelo que apresentou o maior número de soluções ótimas também foi o modelo 1 (100%), seguido por modelo 3 (93,1%), modelo 5 (41,4%), modelo 2 (17,2%), modelo 4 (13,8%) e modelo 6 (3,4%), conforme pode ser observado na Figura 12. Em contrapartida, os que apresentaram o maior número de soluções aproximadas (sem garantia da otimalidade pelo algoritmo *Branch-and-bound*, devido ao tempo de processamento), foram modelo 4 (69,0%) e modelo 6 (65,5%), seguidos do modelo 2 (55,2%) e modelo 5 (24,1%).

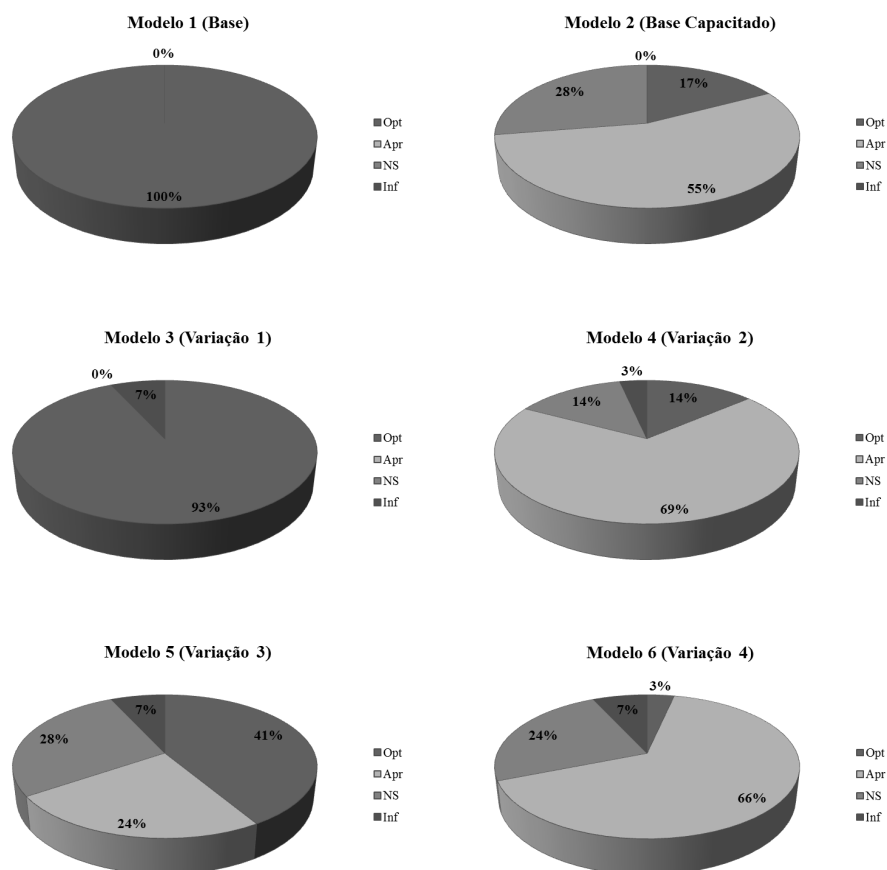


Figura 12 Qualidade da solução encontrada para os seis modelos envolvendo os cenários gerados (Opt = solução ótima encontrada; Apr = solução aproximada encontrada ao final de duas horas de processamento; NS = nenhuma solução encontrada ao final de duas horas de processamento e Inf = solução infactível).

Somente quatro modelos apresentaram soluções infactíveis, sendo o modelo 3 e modelo 5, totalizando 6,9% dos cenários processados e os modelos 4 e 6, representando um total de 3,4%. Isso pode ter ocorrido por dois motivos que são: a) o somatório do volume das UVs foi menor que o limite inferior de capacidade de armazenamento das UPs, como no caso dos cenários pertencentes

ao modelo 4 ou b) a necessidade de UPs calculada (NP) se tornou conflitante com a utilização da restrição de agrupamento, pois não haveria a possibilidade de formação de UPs agrupadas, como no caso dos cenários dos modelos 3, 5 e 6.

Os valores referentes à função objetivo (descontando-se as penalidades) e ao tempo de processamento são apresentados na Tabela 3. Conforme esperado, à medida que novas restrições foram adicionadas aos modelos, aumentando o nível de complexidade do mesmo, aumentou-se também o tempo de processamento. Esse aumento na complexidade também teve impacto na qualidade da solução final dos cenários.

De acordo com os dados da Tabela 3, pode-se observar uma tendência de os menores valores das funções objetivo pertencerem aos modelos 1, 2, 3, 4, 6 e 5. Contudo, vale ressaltar que alguns valores obtidos são aproximados, não representando a solução ótima, o que demonstra que eles ainda poderiam ser reduzidos com o aumento do tempo de processamento.

A análise do valor da função objetivo é importante, pois demonstra, de maneira aproximada, o deslocamento dos equipamentos de arraste e baldeio para a realização da extração da madeira do interior dos talhões e, posteriormente, empilhamento nas bordas dos talhões. No entanto, vale ressaltar que esses valores desconsideram o deslocamento real que ocorre no interior do talhão, levando-se em consideração somente a distância em linha reta entre as UVs e as UPs.

### **5.3 Formação dos eitos, locação das pilhas e sentido de extração da madeira**

O número de eitos obtidos para os seis modelos, nos 29 setores estudados, está apresentado na Tabela 5. Os modelos com maior número de cenários em que não houve uma estratificação clara dos eitos de trabalho das



máquinas de colheita foram, na ordem, Modelo 6, Modelo 5, Modelo 2, Modelo 3, Modelo 4 e Modelo 1, com 70,0%, 63,2%, 14,3%, 11,1%, 8,3% e 0,0%, respectivamente. O maior número de eitos gerados foi 9 e o menor, 1.

Tabela 5 Número total de eitos obtidos, após o pós-processamento, para os 174 cenários gerados.

| Setor | Área (m <sup>2</sup> ) | Tipo de colheita | Tipo de Setor | Número de eitos/modelo |   |   |   |   |   |
|-------|------------------------|------------------|---------------|------------------------|---|---|---|---|---|
|       |                        |                  |               | 1                      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1     | 10.949,35              | CMa              | AC            | 3                      | - | 5 | 3 | - | 0 |
| 2     | 10.983,89              | CMa              | AC            | 1                      | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 3     | 23.417,34              | CMa              | DC            | 2                      | - | 3 | 3 | - | - |
| 4     | 64.996,38              | CMe              | AC            | 3                      | - | 3 | - | - | - |
| 5     | 18.833,09              | CMe              | AC            | 1                      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6     | 5.230,02               | CMa              | DC            | 2                      | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 |
| 7     | 67.222,58              | CMe              | DC            | 4                      | - | 4 | - | - | - |
| 8     | 4.272,14               | CMa              | AC            | 1                      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9     | 8.291,80               | CMa              | AC            | 1                      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10    | 15.518,24              | CMe              | AC            | 2                      | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 11    | 6.667,93               | CMa              | AC            | 1                      | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 12    | 4.834,86               | CMe              | AC            | 2                      | 2 | 3 | 2 | 0 | 2 |
| 13    | 90.377,92              | CMa              | DC            | 5                      | - | 5 | - | - | - |
| 14    | 15.675,73              | CMe              | AC            | 2                      | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 15    | 212,74                 | CMa              | AC            | 1                      | 1 | - | - | - | - |
| 16    | 5.947,35               | CMa              | AC            | 1                      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 17    | 61.556,86              | CMe              | AC            | 2                      | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 18    | 51.632,99              | CMa              | DC            | 5                      | - | 5 | - | - | - |
| 19    | 20.634,63              | CMe              | DC            | 6                      | 6 | 4 | 6 | 0 | 0 |
| 20    | 14.298,31              | CMe              | AC            | 2                      | 2 | 3 | 2 | 0 | 0 |
| 21    | 21.707,90              | CMa              | DC            | 3                      | 1 | 2 | 3 | 1 | - |
| 22    | 40.179,45              | CMe              | DC            | 5                      | 0 | 0 | 5 | 0 | - |
| 23    | 9.168,14               | CMa              | AC            | 3                      | 3 | 2 | 3 | 0 | 0 |
| 24    | 7.581,05               | CMe              | AC            | 4                      | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 |
| 25    | 331,13                 | CMa              | AC            | 2                      | 2 | - | 2 | - | - |
| 26    | 24.856,72              | CMa              | DC            | 2                      | - | 0 | 2 | - | 0 |
| 27    | 31.825,52              | CMe              | AC            | 1                      | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 28    | 31.233,71              | CMa              | DC            | 7                      | - | 9 | 8 | - | 0 |
| 29    | 36.928,47              | CMe              | DC            | 6                      | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |

Em que: “-” = cenário sem solução até duas horas de processamento ou ineficaz; CMa: colheita manual; CMe = colheita mecanizada; AC = setor de área contínua; e DC = setor de área descontínua.

Apesar de se esperar que o número de eitos fosse definido levando-se em consideração o tamanho total das áreas, não houve relação entre essas variáveis, originando eitos com grande variação de tamanho. Esse

comportamento não é desejado, pois o planejamento da colheita deve levar em consideração o escalonamento da produção, para que não ocorra a concentração de trabalho em determinadas frentes de corte, sobrecarregando algumas máquinas em detrimento de outras.

Os resultados obtidos não apresentaram diferenciação quando se comparou as áreas de colheita mecanizada com as de colheita manual. No entanto, houveram algumas diferenças relacionadas à continuidade (em área) do setor analisado. Portanto, para realizar essa análise, consideraram-se duas situações, sendo a) setores de área contínua e b) setores de área descontínua.

a) Setores de área contínua

A análise dos setores de área contínua foi feita utilizando-se como exemplo os resultados obtidos para o setor 17, os quais estão apresentados na Figura 13. Como pode ser observado, a estratificação espacial mais clara dos eitos de trabalho foi obtida no modelo 1 e no modelo 3.

A introdução da restrição de limite volumétrico superior foi à principal responsável por desorganizar espacialmente a estratificação dos eitos. Como pode ser observado, para os modelos 2, 5 e 6, não houve uma estratificação clara das regiões de trabalho das máquinas. No entanto, o modelo 4, no qual foram introduzidos limites volumétricos superior e inferior, apresentou, na maioria dos casos, uma estratificação regular (Tabela 5).

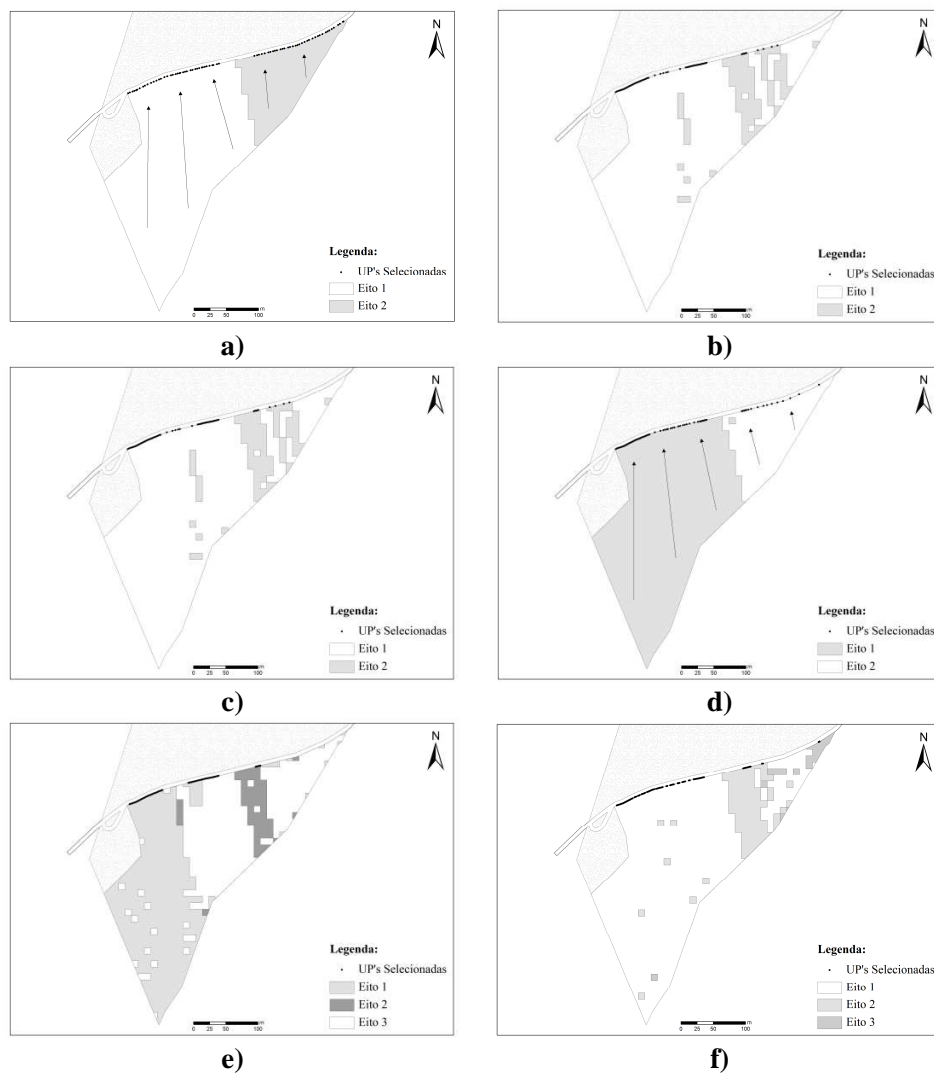


Figura 13 Mapas apresentando os resultados dos seis modelos para o setor 17 (setor de área contínua mecanizada), sendo: a) Modelo 1 (base); b) Modelo 2 (base capacitado); c) Modelo 3 (variação 1); d) Modelo 4 (variação 2); e) Modelo 5 (variação 3) e f) Modelo 6 (variação 4).

Nos cenários em que não houve a utilização de restrições de capacidade volumétrica, houve a formação de pilhas com volume muito acima da capacidade das UPs. Além disso, constatou-se a presença de pilhas

subutilizadas, ou seja, com baixo volume armazenado (Figuras 14a e 14c). Tecnicamente, não se recomenda que a capacidade volumétrica das pilhas seja ultrapassada, pois, além de prejudicar o andamento das operações, também pode colocar em risco a segurança dos funcionários envolvidos.

Avaliando-se a eficácia no uso do controle volumétrico de madeira nas UPs, constatou-se que a estratégia de inserção de limites volumétricos obteve o melhor desempenho, pois, além de permitir a definição automática do número de UPs necessárias para o armazenamento da madeira, também possibilitou a geração de pilhas mais uniformes, por meio de um intervalo volumétrico pré-definido, evitando a subutilização das mesmas (Figuras 14b, 14d, 14e e 14f). Isso ocorreu porque a utilização de limites de capacidade volumétrica permitiu que fosse possível selecionar uma quantidade muitas vezes maior que a necessária, relaxando o modelo (Tabela 6).

Analisando-se a restrição de agrupamento, percebeu-se que a mesma cumpriu sua função de aproximar as UPs selecionadas, formando pilhas mais contínuas. Conforme pode ser constatado na Figura 12, comparando-se os modelos 5 e 6, esse conjunto de restrições, quando associadas a alguma estratégia de controle volumétrico, apresentou melhor desempenho quando foi adotada a estratégia de controle por limites volumétricos, em vez das restrições em que se definiu, previamente, um número fixo de UPs.

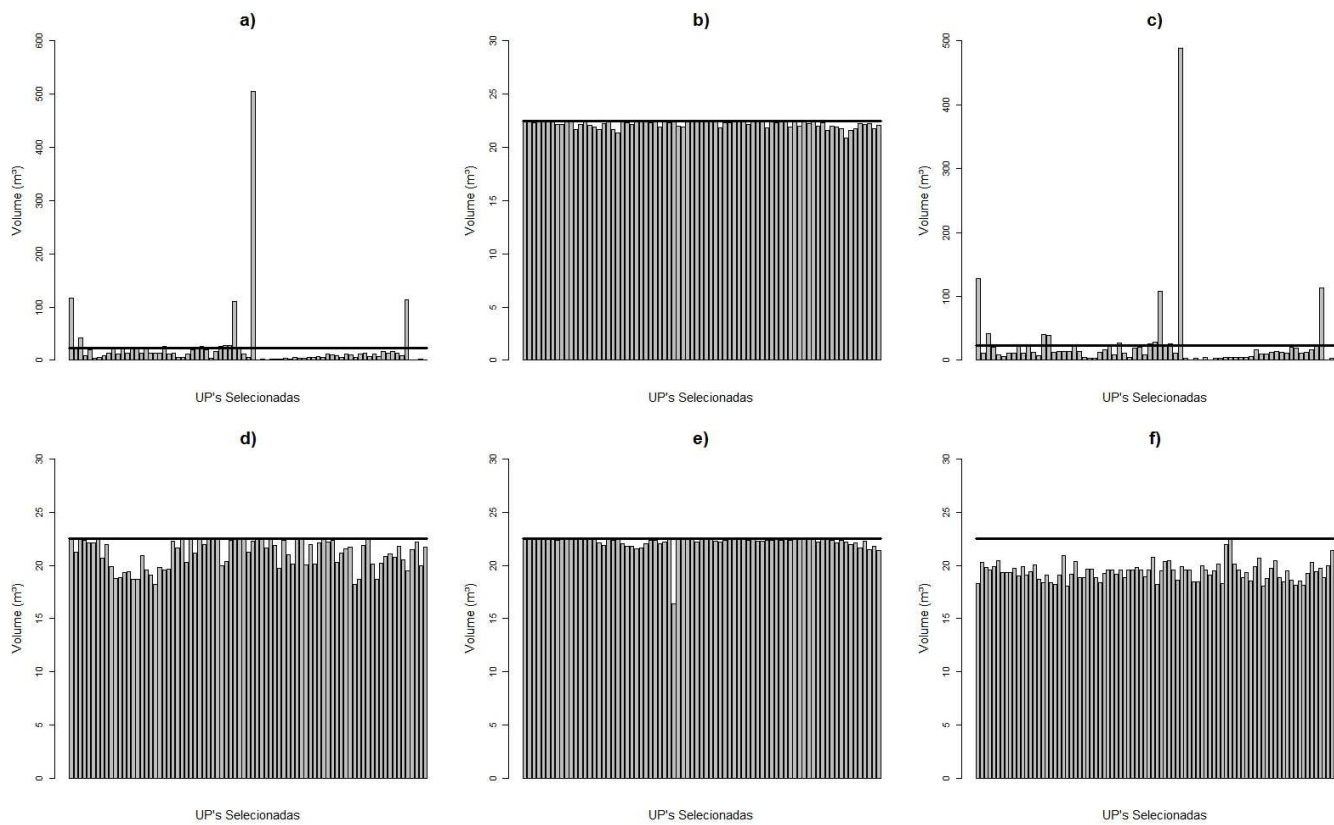


Figura 14 Gráficos apresentando os totais volumétricos de cada UP selecionada dos seis modelos para o setor 17, sendo: a) Modelo 1 (Base); b) Modelo 2 (Base Capacitado); c) Modelo 3 (Variação 1); d) Modelo 4 (Variação 2); e) Modelo 5 (Variação 3); e f) Modelo 6 (Variação 4). A linha horizontal indica a capacidade máxima de armazenamento.

Tabela 6 Número total de pilhas ativadas, após o processamento dos modelos, para os 174 cenários gerados.

| Setor | Tipo de colheita | Tipo de setor | Área (m <sup>2</sup> ) | Número de pilhas/modelo |     |     |    |     |     |     |    |     |    |     |    |
|-------|------------------|---------------|------------------------|-------------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|----|
|       |                  |               |                        | 1                       |     | 2   |    | 3   |     | 4   |    | 5   |    | 6   |    |
|       |                  |               |                        | T                       | AT  | T   | AT | T   | AT  | T   | AT | T   | AT | T   | AT |
| 1     | CMa              | AC            | 10.949,35              | 232                     | 35  | -   | -  | 232 | 35  | 232 | 37 | -   | -  | 232 | 38 |
| 2     | CMa              | AC            | 10.983,89              | 190                     | 37  | 190 | 37 | 190 | 37  | 190 | 39 | 190 | 37 | 190 | 40 |
| 3     | CMa              | DC            | 23.417,34              | 315                     | 74  | -   | -  | 315 | 74  | 315 | 79 | -   | -  | -   | -  |
| 4     | CMe              | AC            | 64.996,38              | 482                     | 102 | -   | -  | 482 | 102 | -   | -  | -   | -  | -   | -  |
| 5     | CMe              | AC            | 18.833,09              | 86                      | 30  | 86  | 30 | 86  | 30  | 86  | 31 | 86  | 30 | 86  | 32 |
| 6     | CMa              | DC            | 5.230,02               | 48                      | 18  | 48  | 18 | 48  | 18  | 48  | 18 | 48  | 18 | 48  | 19 |
| 7     | CMe              | DC            | 67.222,58              | 645                     | 107 | -   | -  | 645 | 107 | -   | -  | -   | -  | -   | -  |
| 8     | CMa              | AC            | 4.272,14               | 66                      | 15  | 66  | 15 | 66  | 15  | 66  | 14 | 66  | 15 | 66  | 15 |
| 9     | CMa              | AC            | 8.291,80               | 32                      | 26  | 32  | 26 | 32  | 26  | 32  | 26 | 32  | 26 | 32  | 28 |
| 10    | CMe              | AC            | 15.518,24              | 90                      | 24  | 90  | 24 | 90  | 24  | 90  | 25 | 90  | 24 | 90  | 26 |
| 11    | CMa              | AC            | 6.667,93               | 79                      | 20  | 79  | 20 | 79  | 20  | 79  | 21 | 79  | 20 | 79  | 21 |
| 12    | CMe              | AC            | 4.834,86               | 162                     | 8   | 162 | 8  | 162 | 8   | 162 | 8  | 162 | 8  | 162 | 8  |
| 13    | CMa              | DC            | 90.377,92              | 564                     | 267 | -   | -  | 564 | 267 | -   | -  | -   | -  | -   | -  |
| 14    | CMe              | AC            | 15.675,73              | 80                      | 24  | 80  | 24 | 80  | 24  | 80  | 26 | 80  | 24 | 80  | 27 |
| 15    | CMa              | AC            | 212,74                 | 40                      | 2   | 40  | 2  | -   | -   | -   | -  | -   | -  | -   | -  |
| 16    | CMa              | AC            | 5.947,35               | 32                      | 16  | 32  | 16 | 32  | 16  | 32  | 16 | 32  | 16 | 32  | 18 |
| 17    | CMe              | AC            | 61.556,86              | 197                     | 77  | 197 | 77 | 197 | 77  | 197 | 81 | 197 | 77 | 197 | 88 |
| 18    | CMa              | DC            | 51.632,99              | 329                     | 122 | -   | -  | 329 | 122 | -   | -  | -   | -  | -   | -  |
| 19    | CMe              | DC            | 20.634,63              | 143                     | 25  | 143 | 25 | 143 | 25  | 143 | 26 | 143 | 25 | 143 | 28 |
| 20    | CMe              | AC            | 14.298,31              | 179                     | 18  | 179 | 18 | 179 | 18  | 179 | 19 | 179 | 18 | 179 | 18 |
| 21    | CMa              | DC            | 21.707,90              | 328                     | 52  | 328 | 52 | 328 | 52  | 328 | 56 | 328 | 52 | -   | -  |
| 22    | CMe              | DC            | 40.179,45              | 371                     | 48  | 371 | 48 | 371 | 48  | 371 | 51 | 371 | 48 | -   | -  |
| 23    | CMa              | AC            | 9.168,14               | 55                      | 25  | 55  | 25 | 55  | 25  | 55  | 26 | 55  | 25 | 55  | 27 |
| 24    | CMe              | AC            | 7.581,05               | 206                     | 10  | 206 | 10 | 206 | 10  | 206 | 10 | 206 | 10 | 206 | 10 |
| 25    | CMa              | AC            | 331,13                 | 75                      | 2   | 72  | 2  | -   | -   | 75  | 1  | -   | -  | -   | -  |
| 26    | CMa              | DC            | 24.856,72              | 267                     | 70  | -   | -  | 267 | 70  | 267 | 77 | -   | -  | 267 | 80 |
| 27    | CMe              | AC            | 31.825,52              | 211                     | 44  | 211 | 44 | 211 | 44  | 211 | 47 | 211 | 44 | 211 | 47 |
| 28    | CMa              | DC            | 31.233,71              | 294                     | 87  | -   | -  | 294 | 87  | 294 | 97 | -   | -  | 294 | 98 |
| 29    | CMe              | DC            | 36.928,47              | 241                     | 51  | 241 | 51 | 241 | 51  | 241 | 54 | 241 | 51 | 241 | 59 |

Em que: T = número total de pilhas; AT = número de pilhas ativadas.

b) Setores de área descontínua

A descontinuidade do setor apresentou o mesmo comportamento, quando comparada com os setores contínuos (Figura 15). Assim, a estratificação espacial mais clara dos eitos de trabalho também foi obtida no modelo 1 e no modelo 3. Em alguns casos, surgiu a formação de eitos descontínuos, como no modelo 3, em que a madeira a ser extraída de uma região do setor deveria cruzar parte de outro setor para, então, ser empilhada nas margens das estradas (Figura 15c). Esse comportamento não é recomendado, uma vez que a madeira contida no setor vizinho ainda não tenha sido extraída, prejudicando, assim, a movimentação das máquinas. Contudo, esse problema é resolvido processando-se cada área de um mesmo setor descontínuo de forma separada.

Os modelos resultaram em eitos com sentidos de extração opostos quando existia mais de uma estrada margeando os setores. No entanto, vale ressaltar que nenhum critério relacionado à altitude dos locais foi adotado para formação dos eitos. Portanto, isso pode fazer com que uma máquina tenha que mobilizar maior esforço para extrair a madeira de locais de altitudes menores para, então, empilhá-la em locais de altitudes maiores, o que não é recomendado dependendo da inclinação do local.

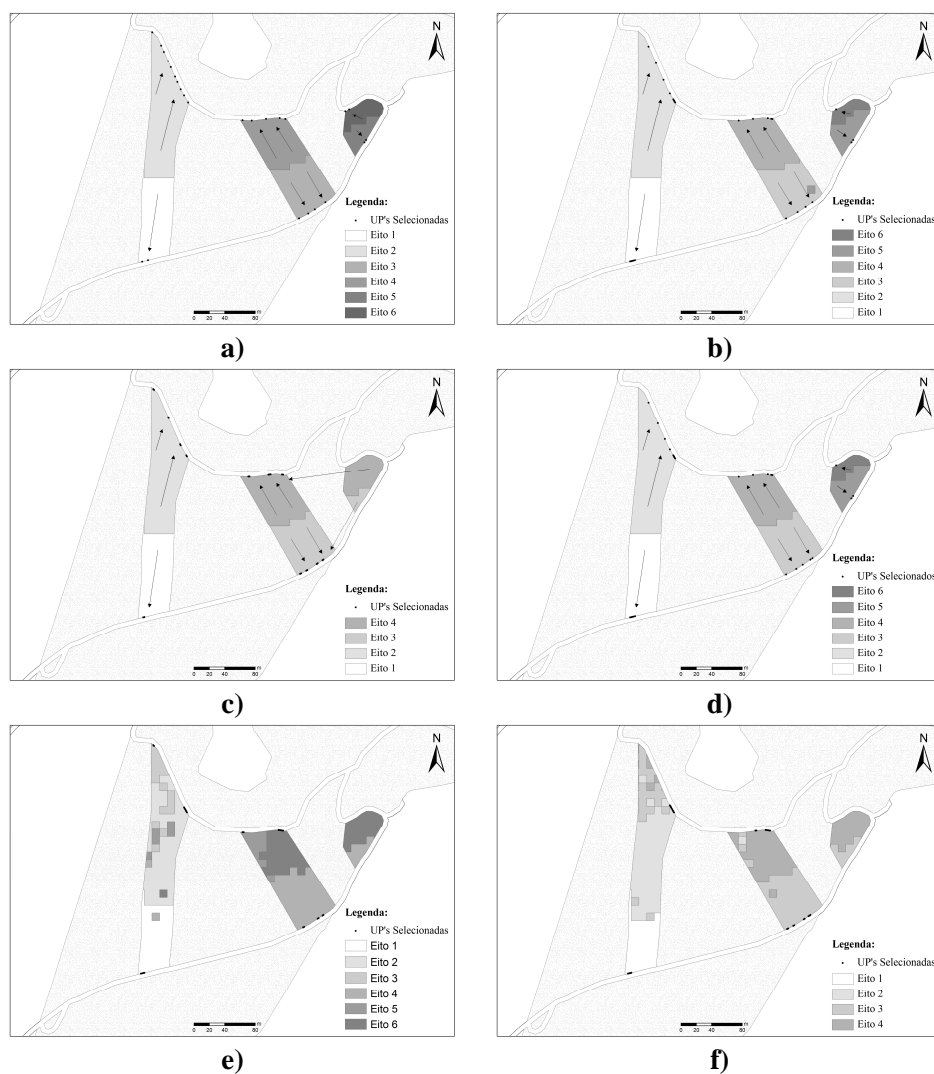


Figura 15 Mapas apresentando os resultados dos seis cenários estudados para o setor 19 (setor de área descontínua mecanizado), sendo: a) Modelo base; b) Modelo base capacitado; c) Variação 1; d) Variação 2; e) Variação 3 e f) Variação 4.

Considerando-se situações envolvendo setores com áreas menores que 2 ha, como os do setor 19, pode-se adotar o modelo 2 como satisfatório, uma vez que foi possível, até esse limite de área, identificar regiões bem delimitadas



espacialmente. No entanto, com o aumento da área, a solução visual desse modelo foi prejudicada pela introdução da restrição de volume (Figura 16).

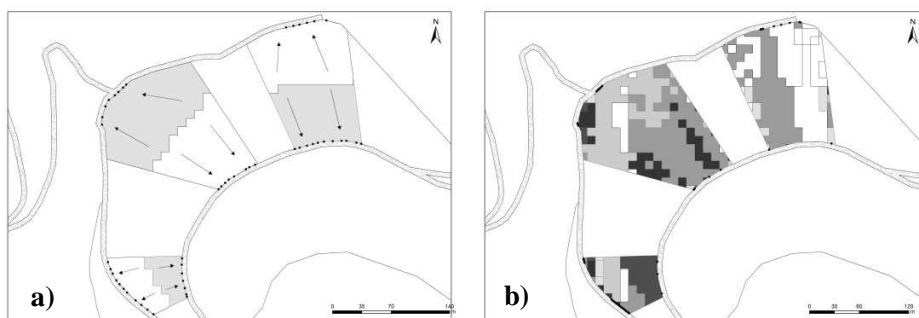


Figura 16 Mapas apresentando os resultados dos modelos base (a) e base capacitado (b) para o setor 29.

Devido ao tempo de processamento limitado em duas horas, as soluções encontradas para os diferentes setores de área contínua e descontínua poderiam ser melhoradas. Portanto, é importante que se considere a qualidade da solução final. Assim, se uma solução aproximada foi utilizada, deve-se ter em mente que poderiam existir soluções melhores.

Conforme observado na Figura 17, o comportamento volumétrico nesta situação se assemelhou ao da situação de setores de área contínua, ou seja, os modelos 1 e 3 geraram respostas em que a capacidade de armazenamento das UPs não foi obedecida.

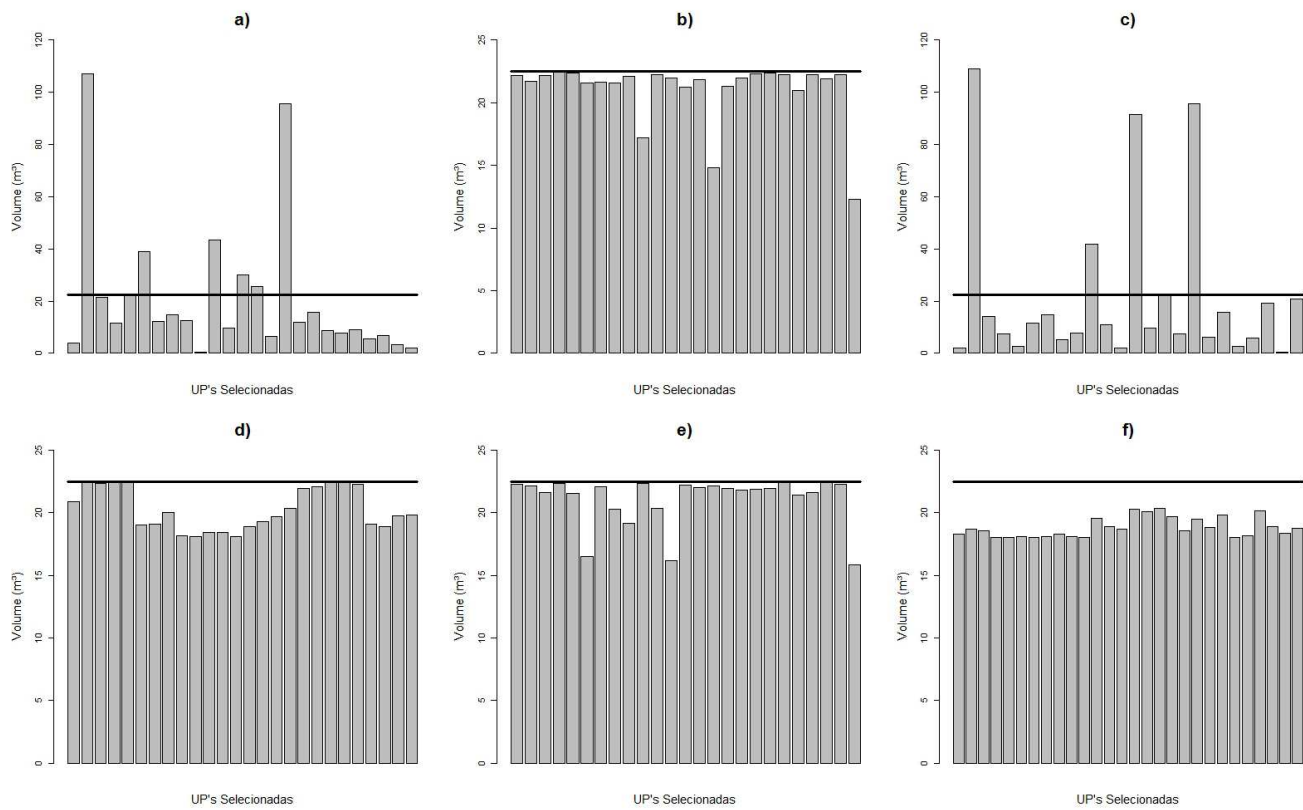


Figura 17 Gráficos apresentando os totais volumétricos armazenados em cada UP selecionada dos seis modelos para o setor 19, sendo: a) Modelo 1(Base); b) Modelo 2 (Base Capacitado); c) Modelo 3 (Variação 1); d) Modelo 4 (Variação 2); e) Modelo 5 (Variação 3); e f) Modelo 6 (Variação 4). A linha horizontal indica a capacidade máxima de armazenamento.

A partir da análise conjunta dos modelos concluiu-se que o modelo mais eficaz para a determinação dos eitos de corte foi o modelo 1, seguido do modelo 4. Entre esses modelos, o único que apresentou uma estratégia de controle eficiente do volume empilhados nas UPs foi o modelo 4. Portanto, pode-se afirmar que esse modelo representa a melhor alternativa para planejamento operacional da colheita florestal, no que diz respeito aos problemas estudados.

## 6 CONCLUSÕES

- a) Os modelos desenvolvidos e avaliados apresentaram variáveis de decisão e restrições em excesso, o que torna o processamento demorado, em especial nos setores de maiores áreas. Isso pode acarretar em dificuldades de processamento e operacionalização da metodologia.
- b) A estratégia de inclusão de limites volumétricos se apresenta mais consistente frente à fixação prévia do número de UPs. Essa opção torna o modelo mais flexível e com menor demanda de tempo de processamento, bem como volumes mais uniformes nas pilhas. Já com relação ao grupo de restrições de agrupamento desenvolvido, percebe-se que esse cumpre o objetivo de aproximar as UPs selecionadas pelos modelos de forma aceitável. No entanto, sua utilização pode implicar de forma negativa na formação dos eitos.
- c) O modelo mais eficaz para estratificar a área em eitos foi o Modelo 1, seguido do Modelo 4. No entanto, o modelo 4 tem a vantagem de controlar o volume empilhado de forma eficiente. Portanto, esse modelo é o melhor modelo avaliado.
- d) A multidisciplinaridade envolvida nesse trabalho se apresenta como uma boa alternativa para integração entre métodos precisos de obtenção das matrizes que abastecem os modelos de programação linear, visando à otimização do planejamento da colheita florestal.

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Adicionar a variável altitude nos modelos matemáticos, para evitar que uma máquina empenhe um esforço desnecessário para realizar as operações de extração/baldeio, em locais íngremes.
- b) Desenvolver restrições para controlar a área dos eitos formados, visando regular as operações de colheita e não sobrecarregar algumas frentes de corte em detrimento a outras.
- c) Estudar a implementação de outras abordagens para resolução do problema estudado por meio da programação linear, como por exemplo, programação por metas (*Goal Programming*), programação linear inteira mista (PLIM), meta-heurísticas (*Simulated Annealing* e Algoritmo Genético) e heurísticas (HYBRID).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDALRAFT, N. et al. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and lagrangean relaxation. **Operations Research**, Baltimore, v. 51, n. 4, p. 613-628, July/Aug. 2003.

ANDERSSON, D. **Approaches to integrated strategic/tactical forest planning**. 2005. 29 p. Licentiate Thesis (Thesis of Forest Science)-University of Agricultural Sciences, Umeå, 2005.

ANDERSSON, D.; ERIKSSON, L. O. Effects of temporal aggregation in integrated strategic/tactical and strategic forest planning. **Forest Policy and Economics**, Amsterdam, v. 9, n. 8, p. 965-981, May 2007.

ARCE J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando à minimização de custos**. 1997. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 207-217, abr. 2004.

ARENALES, M. N.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R. **Pesquisa operacional**: para cursos de engenharia. 2. reimpr. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 523 p.

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SESSIONS, J. Intensifying a heuristic forest harvest scheduling search procedure with 2-opt decision choices. **Canadian Journal Foresty Research**, Ottawa, v. 29, p. 1784-1792, July 1999.

BOSTON, K.; BETTINGER, P. Development of spatially feasible forest plans: a comparison of two modeling approaches. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 35, n. 4, p. 425-435, 2001.

BUONGIORNO J.; GILLESS J. K. **Forest management and economics: a primer in quantitative methods**. New York: Macmillan, 1987. 285 p.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. San Diego: Academic, 2003.

CHEN, Y.-T.; ZHENG, C.; CHANG, C.-T. Efficiently mapping an appropriate thinning schedule for optimum carbon sequestration: an application of multi-segment goal programming. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 7, p. 1168-1173, Oct. 2011.

CHINNECK, J. W.; MOLL, R. H. H. Processing network models for forest management. **Omega**, v. 23, n. 5, p. 499-510, Oct. 1995.

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

DAVIS, L. S. et al. **Forest management**. New York: McGraw Hill, 2000.

DE MELLO, A. A. et al. Programming the supply of raw material of a forestry industry using *Goal Programming* and considering carbon stock. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 4, p. 341-350, out./dez. 2008.

DEMERS, C.; LONG, A.; CLAUSEN, R. **What is in a natural resource management plan?** Gainesville: University of Florida, 2001.

DIAZ-BALTEIRO, L.; BERTOMEU, M.; BERTOMEU, M. Optimal harvest scheduling in *Eucalyptus* plantations: a case study in Galicia (Spain). **Forest Policy and Economics**, Amsterdam, v. 11, n. 8, p. 548-554, Dec. 2009.

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

EPSTEIN, R. et al. A system for the design of short term harvesting strategy. **European Journal of Operational Research**, Kidlington, v. 119, n. 2, p. 427-439, 1999.

FORSBURG, 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, 2005.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and intractability, a guide to the theory of NP-completeness**. 1. ed. New York: Freeman, 1979.

GUNN, E.A. Some aspects of hierarchical production planning in forest management In: SYMPOSIUM ON SYSTEMS ANALYSES IN FOREST RESOURCES, 1991, Charleston, South Carolina. **Proceedings...** Asheville, NC:USDA, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1991. p. 54 - 62.

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

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J.; HILLIER, M. **Introduction to operations research**. New York: McGraw-Hill, 1990.

HILTUNEN, V. et al. Mesta: an internet-based decision-support application for participatory strategic-level natural resources planning. **Forest Policy and Economics**, Amsterdam, v. 11, n. 1, p. 1-9, Jan. 2009.

IGNIZIO, J. P.; CAVALIER, T. M. **Linear programming**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994. 666 p.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives-discussion and synthesis. **Forest Science**, Lawrence, v. 23, n. 18, 1977. Supplement.



KANGAS, A.; KANGAS, J.; KURTTLA, M. **Decision support for forest management**. [S. l.]: Springer Verlag, 2008. 45 p.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

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

LIMA, M. P. D. et al. Methodology for planning log stacking using geotechnology and operations research. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 309-319, jul./set. 2011.

LOPES, S. E. et al. Avaliação técnica e econômica de um "skidder" operando em diferentes produtividades e distâncias de extração. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 6, p. 1621-1626, nov./dez. 2009.

MACHADO C. C.; LOPES E. S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 124-129, 2000.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2008. Cap. 1, p. 15-42.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. da S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2008. Cap. 7, p.169-212.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A. Sistemas. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2008. p. 161-184.

MALINOVSKI, R. A. et al. Otimização da distância de extração de madeira com *forwarder*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 171-179, set. 2008.

MALINOVSKI, R. A. et al. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, 2006.

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

MARTINHAGO, A. Z. **Otimização para locação de pátios de estocagem para exploração de impacto reduzido na amazônia**. 2012.162 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

MELO, M. T.; NICKEL, S.; SALDANHA-da-GAMA, F. Facility location and supply chain management – a review. **European Journal of Operational Research**, Kidlington, v. 196, n. 2, p. 401-412, 2009.

MEILBY, H.; STRANGE, N.; THORSEN, B. J. Optimal spatial harvest planning under risk of windthrow. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 149, n. 1, p. 15-31, Aug. 2001.

MINETTE, J. L. et al. Carregamento e descarregamento. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2008. Cap. 5, p.146-160.

MITCHELL, S. A. **Operational forest harvest scheduling optimization** – a mathematical model and solution strategy. 2004. 252 f. Thesis (PhD Engineering Science)-University of Auckland, Auckland, 2004.

NAJAFI, A. et al. Planning and assessment of alternative forest road and skidding networks. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 29, n. 1, p. 63-73, June 2008.

NASCIMENTO, F. A. F. de. et al. Uso da metaheurística otimização por exame de partículas no planejamento florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 557-565, dez. 2012.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 44, n. 1, p. 77-89, 2010.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L.O. Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.161, n. 1, p.221-230, May 2002.

PINTO, K. R. **Aprendendo a decidir com a pesquisa operacional**: modelos e métodos de apoio à decisão. 1. ed. Uberlândia: EDUFU, 2005. 114 p.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 19 fev. 2013.

RESENDE, M. G. C.; WERNECK, R. F. A hybrid heuristic for the p-median problem. **Journal of Heuristics**, Boston, v. 10, n. 1, p. 59-88, 2004.

RIDEOUT, D. B. et al. Estimating rates of substitution for protecting values at risk for initial attack planning and budgeting. **Forest Policy and Economics**, Amsterdam, v. 10, n. 4, p. 205-219, Feb. 2008.

RODRIGUES, L. F.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; DE SOUZA, A. G.; RIBEIRO, C. A. A. S. Metaheurística Simulated Annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 247-256, Abr. 2004.

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

RUSTAGI, K. P. Forest management planning for timber production: a sequential approach. In: INTERNATIONAL UNION OF FORESTRY RESEARCH ORGANIZATIONS. **Operational forest management planning methods**: proceedings, meeting of steering systems project group. Bucharest, 1978. p. 68-75.

SALMERON, A. **Mecanização da exploração florestal**. Piracicaba: IPEF, 1980. 10 p. (Circular Técnica, 88).

SANT'ANNA, C. de M. Corte. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2008. Cap. 3, p. 66-96.

SEIXAS, F. Extração. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2008. Cap. 4, p. 97-145.

SESSIONS, J.; BETTINGER, P. Hierarchical planning: pathway to the future? Precision forestry:. In: INTERNATIONAL DECISION FORESTRY COOPERATIVE SYMPOSIUM, 1., 2001, Seattle . **Proceedings...** Seattle, Washington. 2001.

SILVA, E. M. et al. **Pesquisa operacional**. São Paulo: Atlas, 1995. 474 p.

SIMÕES, D.; FENNER, P. T. Avaliação técnica e econômica do *forwarder* na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 711-720, out./dez. 2010.

TAHA, H. A. **Investigación de operaciones**. 5. ed. México: Alfaomega, 1994. 960 p.

TARNOWSKI, B. C.; SCHNEIDER, P. R.; MACHADO, C. C. Produtividade e custos do processador trabalhando em povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 103-115, 2009.

WU, B. G.; DING, Q. L.; WANG, L. Y. A forestation planning expert decision advisory system. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 50, n. 5, p. 1399-1404, Dec. 2007.

ZHANG, F.; JOHNSON, D. M.; SUTHERLAND, J. W. A GIS-based method for identifying the optimal location for a facility to convert forest biomass to biofuel. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 9, p. 3951-3961, Oct. 2011.

## APÊNDICES

### LEGENDA:

UV = Unidade de Volume.

UP = Unidade de Pilha de Madeira.

I = Índice referente à variável UV.

J = Índice referente à variável UP.

VOLUME = Vetor de volume das UVs ( $V_i$ ).

CAPACIDADE e CAPACIDADE2 = Vetores de capacidade de empilhamento das UPs ( $V_j$ ).

DIST = Matriz de distância euclidiana entre as UVs e as UPs ( $C_{ij}$ ).

SEQ = Matriz de vizinhança entre as UPs ( $a_{jj}$ ).

PV = Vetor de presença de vizinhos ( $PV_j$ ).

NV = Vetor número de vizinhos ( $NV_j$ ).

X = Variável de decisão binária referente a ativação ou não do arco que liga a UV(I) à UP(J).

Y = Variável de decisão binária referente a ativação ou não da UP(J).

W = Variável de decisão binária referente à ativação ou não da penalidade (J) ocasionada pela não junção de UPs vizinhas.

NUP = Variável escalar que limita o número de UPs a serem selecionadas pelo modelo.

APÊNDICE A □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 1.

```

MODEL:
SETS:
    UP:Y;
    UV;
    LINKS(UV,UP):DIST,X;
ENDSETS
!Entrada de dados;
DATA:
    UV=UV1..UVn;
    UP=UP1..UPm;
    DIST=@FILE('file');
ENDDATA
!FUNÇÃO OBJETIVO;
    MIN=@SUM(LINKS(I,J):DIST(I,J)*X(I,J));
!RESTRIÇÕES;
    @FOR(UV(I):@SUM(LINKS(I,J):X(I,J))=1);
    @FOR(UV(I):@FOR(UP(J):X(I,J)<=Y(J)));
!Declaração das variáveis;
    @FOR(LINKS(I,J):@BIN(X(I,J)));
    @FOR(UP(J):@BIN(Y(J)));
END

```

APÊNDICE B □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 2.

```

MODEL:
SETS:
    UV:VOLUME;
    UP:CAPACIDADE,Y;
    LINKS(UV,UP):DIST,X;
ENDSETS
!Entrada de dados;
DATA:
    UV=UV1..UVn;
    UP=UP1..UPm;
    VOLUME = @FILE('file');
    CAPACIDADE = @FILE('file');
    DIST=@FILE('file');
ENDDATA
!FUNÇÃO OBJETIVO;
    MIN=@SUM(LINKS(I,J):DIST(I,J)*X(I,J));
!RESTRICÇÕES;
    @FOR(UV(I):@SUM(LINKS(I,J):X(I,J))=1);
    @FOR(UV(I):@FOR(UP(J):X(I,J)<=Y(J)));
    @FOR(UP(J):@SUM(UV(I):X(I,J)*VOLUME(I))<=CAPACIDADE(J)*Y(J));

!Declaração das variáveis;
    @FOR(LINKS(I,J):@BIN(X(I,J)));
    @FOR(UP(J):@BIN(Y(J)));
END

```



APÊNDICE C □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 3.

```

MODEL:
SETS:
    UV;
    UP:PV,W,NV,Y;
    LINKS(UV,UP):DIST,X;
    LINKS2(UP,UP):SEQ;
ENDSETS
DATA:
    PENALIDADE = ...;
    UV=UV1..UVn;
    UP=UP1..UPm;
    DIST=@FILE('file');
    SEQ=@FILE('file');
    PV=@FILE('file');
    NV=@FILE('file');
ENDDATA
!FUNÇÃO OBJETIVO;
    MIN=(@SUM(LINKS(I,J):DIST(I,J)*X(I,J))+@SUM(UP(J):PENALIDADE*
W(J)));
!RESTRICÇÕES;
    @FOR(UV(I):@SUM(LINKS(I,J):X(I,J))=1);
    @FOR(UV(I):@FOR(UP(J):X(I,J)<=Y(J)));
    @FOR(UP(K):@SUM(UP(J):SEQ(K,J)*Y(J))+W(K)>=(NV(K)-1)*PV(K));
!Declaração das variáveis;
    @FOR(LINKS(I,J):@BIN(X(I,J)));
    @FOR(UP(J):@BIN(Y(J)));
    @FOR(UP(K):@BIN(W(K)));
END

```

APÊNDICE D □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 4.

```

MODEL:
SETS:
    UV:VOLUME;
    UP:CAPACIDADE,CAPACIDADE2,Y;
    LINKS(UV,UP):DIST,X;
ENDSETS
DATA:
    UV=UV1..UVn;
    UP=UP1..UPm;
    VOLUME = @FILE('file');
    CAPACIDADE = @FILE('file');
    CAPACIDADE2 = @FILE('file');
    DIST=@FILE('file');
ENDDATA
!FUNÇÃO OBJETIVO;
    MIN=@SUM(LINKS(I,J):DIST(I,J)*X(I,J));
!RESTRICÇÕES;
    @FOR(UV(I):@SUM(LINKS(I,J):X(I,J))=1);
    @FOR(UV(I):@FOR(UP(J):X(I,J)<=Y(J)));
    @FOR(UP(J):@SUM(UV(I):X(I,J)*VOLUME(I))<=CAPACIDADE(J)*Y(J));
    @FOR(UP(J):@SUM(UV(I):X(I,J)*VOLUME(I))>=CAPACIDADE2(J)*Y(J)
);

!Declaração das variáveis;
    @FOR(LINKS(I,J):@BIN(X(I,J)));
    @FOR(UP(J):@BIN(Y(J)));
END

```

APÊNDICE E □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 5.

```

MODEL:
SETS:
    UV:VOLUME;
    UP:CAPACIDADE,PV,W,NV,Y;
    LINKS(UV,UP):DIST,X;
    LINKS2(UP,UP):SEQ;
ENDSETS
DATA:
    NUP = ...;
    PENALIDADE=...;
    UV=UV1..UVn;
    UP=UP1..UPm;
    VOLUME = @FILE('file');
    CAPACIDADE = @FILE('file');
    DIST=@FILE('file');
    SEQ=@FILE('file');
    PV=@FILE('file');
    NV=@FILE('file');
ENDDATA
!FUNÇÃO OBJETIVO;
    MIN=(@SUM(LINKS(I,J):DIST(I,J)*X(I,J))+@SUM(UP(J):PENALIDADE*
W(J)));
!RESTRICÇÕES;
    @FOR(UV(I):@SUM(LINKS(I,J):X(I,J))=1);
    @FOR(UV(I):@FOR(UP(J):X(I,J)<=Y(J)));
    @FOR(UP(J):@SUM(UV(I):X(I,J)*VOLUME(I))<=CAPACIDADE(J)*Y(J));
    @SUM(UP(J):Y(J))=NUP;
    @FOR(UP(K):@SUM(UP(J):SEQ(K,J)*Y(J))+W(K)>=(NV(K)-1)*PV(K));
!Declaração das variáveis;
    @FOR(LINKS(I,J):@BIN(X(I,J)));
    @FOR(UP(J):@BIN(Y(J)));
    @FOR(UP(K):@BIN(W(K)));
END

```

APÊNDICE F □ Rotina desenvolvida e programada no LINGO para o modelo 6.

```

MODEL:
SETS:
    UV: VOLUME;
    UP: CAPACIDADE, CAPACIDADE2, PV, W, NV, Y;
    LINKS(UV, UP): DIST, X;
    LINKS2(UP, UP): SEQ;
ENDSETS
DATA:
    PENALIDADE = ...;
    UV = UV1..UVn;
    UP = UP1..UPm;
    VOLUME = @FILE('file');
    CAPACIDADE = @FILE('file');
    CAPACIDADE2 = @FILE('file');
    DIST = @FILE('file');
    SEQ = @FILE('file');
    PV = @FILE('file');
    NV = @FILE('file');
ENDDATA
!FUNÇÃO OBJETIVO;
    MIN = (@SUM(LINKS(I, J): DIST(I, J) * X(I, J)) + @SUM(UP(J): PENALIDADE *
W(J)));
!RESTRICÇÕES;
    @FOR(UV(I): @SUM(LINKS(I, J): X(I, J)) = 1);
    @FOR(UV(I): @FOR(UP(J): X(I, J) <= Y(J)));
    @FOR(UP(J): @SUM(UV(I): X(I, J) * VOLUME(I)) <= CAPACIDADE(J) * Y(J));
    @FOR(UP(J): @SUM(UV(I): X(I, J) * VOLUME(I)) >= CAPACIDADE2(J) * Y(J)
);
    @FOR(UP(K): @SUM(UP(J): SEQ(K, J) * Y(J)) + W(K) >= (NV(K) - 1) * PV(K));
!Declaração das variáveis;
    @FOR(LINKS(I, J): @BIN(X(I, J)));
    @FOR(UP(J): @BIN(Y(J)));
    @FOR(UP(K): @BIN(W(K)));
END

```