



**ANDRÉ LARA DE MIRANDA MOURA**

**PLANEJAMENTO ANUAL OTIMIZADO DE  
ATIVIDADES SILVICULTURAIS COM  
RESTRIÇÃO DE RECURSOS E MÚLTIPLOS  
MODOS DE EXECUÇÃO**

**LAVRAS – MG**

**2013**

**ANDRÉ LARA DE MIRANDA MOURA**

**PLANEJAMENTO ANUAL OTIMIZADO DE ATIVIDADES  
SILVICULTURAIS COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS E MÚLTIPLOS  
MODOS DE EXECUÇÃO**

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**

Moura, André Lara de Miranda.

Planejamento anual otimizado de atividades silviculturais com restrição de recursos e múltiplos modos de execução / André Lara de Miranda Moura. – Lavras : UFLA, 2013.

115p. : il.

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

Orientador: Lucas Rezende Gomide.

Bibliografia.

1. Regulação Silvicultural. 2. Programação de projetos. 3. Programação linear. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.9283

**ANDRÉ LARA DE MIRANDA MOURA**

**PLANEJAMENTO ANUAL OTIMIZADO DE ATIVIDADES  
SILVICULTURAIS COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS E MÚLTIPLOS  
MODOS DE EXECUÇÃO**

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 22 de Março de 2013.

Dr. Antônio Donizette de Oliveira                      UFLA

Dr. Júlio Eduardo Arce                                      UFPR

Dr. Lucas Rezende Gomide  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2013**

À minha esposa Mariana, pela compreensão e companheirismo, aos meus pais,  
Fernando e Elaine, pelo apoio nessa jornada e na vida, à minha irmã Fabiana,  
pelo estímulo e pelo exemplo.

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS pelo dom da vida e pela saúde.

Ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras, em especial ao LEMAF, pela e disponibilidade da ótima estrutura de trabalho.

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudo tão importante aos estudantes de Pós-Graduação.

Ao Prof. Lucas Rezende Gomide pela contínua troca de idéias, orientações, amizade e apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

APLANTAR pela disponibilização dos dados e pela disponibilidade de seus funcionários, em especial Sandro Longuinho, Luiz Alvarenga e Alisson Lima, para esclarecimentos e conversas diversas.

Ao colega André Faria pelo aprendizado, amizade e convivência nos difíceis momentos de desenvolvimento do trabalho e aos colegas Elliezer Melo e Ernani Possato pelo companheirismo e apoio durante esta jornada.

Aos antigos colegas de trabalho da SAVCOR, pela experiência e aprendizado obtido ao longo do período em que convivemos.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Um dos problemas que desafiam os gestores silviculturais está associado à capacidade de reposição das áreas colhidas anualmente em um povoamento florestal. Devido, principalmente, a imposições técnicas e limitações operacionais, o plantio e a colheita dificilmente ocorrem no mesmo ritmo. A busca por um equilíbrio entre a demanda de plantio e a capacidade de execução de atividades silviculturais pode ser entendida como “Regulação Silvicultural”. Assim, o estudo concentrou-se em desenvolver modelos de programação linear úteis à elaboração de planos anuais de atividades silviculturais, tendo como direcionamento, a “Regulação Silvicultural”. Com o intuito de representar situações de prestação de serviços silviculturais, níveis mínimos de lucratividade desejada sobre o projeto florestal foram considerados. Os dados utilizados foram obtidos de um projeto de reforma de um povoamento de eucalipto com 1.278,39 ha, distribuídos em 36 talhões, pertencente a uma empresa florestal. O histórico operacional dos talhões foi utilizado para definir o pacote tecnológico recomendado para cada talhão, sendo definidas, para cada situação operacional, as relações de dependência entre as atividades e os intervalos necessários entre as atividades. Restrições de disponibilidade de recursos e metas periódicas de execução de atividades foram incorporadas aos modelos para permitir que a programação das atividades respeitasse a capacidade operacional máxima da empresa. Os resultados demonstraram que o processo silvicultural pode ser representado através de técnicas de programação linear, sendo que o modelo contendo variável de decisão contínua se mostrou mais adequado para aplicação prática.

Palavras-chave: Regulação Silvicultural. Programação de Projetos. Programação. Linear.

## **ABSTRACT**

One of the challenges that silviculture managers face is related to the replacing capacity of the areas that are annually harvested. Due to technical and operational restrictions planting and harvesting activities hardly occur in the same pace. Therefore, silvicultural regulation aims to balance planting demands generated by forest harvesting with the company's execution actual capacity regarding silviculture activities. This study was focused on developing linear programming models to support elaborating silviculture operational plans which are compatible with silviculture regulation concepts. In order to represent outsourcing silviculture services scenarios profitability minimum levels were incorporated. Data from a 1.278,39 ha eucalyptus forest plantation distributed in 36 stands was used. Each stand was classified according to its operational background which identified the last silvicultural activity performed. A specific set of activities and time periods between activities were recommended for stands having similar operational backgrounds. Availability recourse constrains and activity execution targets were incorporated so that the activities scheduling were compatible with the company's maximum operational capacity. Results indicated that the silvicultural process could successfully be represented by linear programming techniques. The model having continuous variables demonstrated to be more interesting for practical applications.

**Key words:** Silvicultural Regulation. Project Scheduling. Linear Programming.



## LISTA DE FIGURAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 1  | Fluxograma dos processos relacionados ao planejamento anual de atividades silviculturais .....  | 17 |
| Figura 2  | Operação de subsolagem combinada com adubação.....  | 21 |
| Figura 3  | Operação de plantio mecanizado através de equipamento específico.....   | 23 |
| Figura 4  | Exemplo ilustrativo da realização da atividade de adubação de cobertura mecanizada.....   | 24 |
| Figura 5  | Foto ilustrativa da operação de combate localizado às formigas cortadeiras .....  | 26 |
| Figura 6  | Fluxograma da estrutura hierárquica de funcionamento do planejamento florestal .....  | 28 |
| Figura 7  | Mapa de localização da área de estudo contendo a distribuição espacial dos talhões que a compõem.....   | 35 |
| Figura 8  | Distribuição espacial dos 36 talhões por situação operacional definida.....   | 38 |
| Figura 9  | Fluxograma de recomendação técnica informando a dependência entre as atividades e os períodos permitidos de realização das mesmas, considerando a situação operacional I, sendo a) época chuvosa e b) época seca.....   | 43 |
| Figura 10 | Fluxograma de recomendação técnica informando a dependência entre as atividades e os períodos permitidos de realização das mesmas, considerando a situação operacional II.....  | 43 |
| Figura 11 | Fluxograma de recomendação técnica informando a dependência entre as atividades e os períodos permitidos de realização das mesmas, considerando a situação operacional III, sendo a) época chuvosa e b) época seca..... | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 12 Plano Técnico de Atividades Silviculturais (PTAS) conforme cronograma hierárquico das atividades propostas para as situações operacionais I, II e III .....  | 33 |
| Figura 13 Fluxograma apresentando a forma de cálculo da receita líquida esperada por atividade .....   | 39 |
| Figura 14 Resultados apresentados após o processamento do cenário 1 .....  | 66 |
| Figura 15 Distribuição temporal incoerente das atividades recomendadas ao talhão 1 resultante do processamento do cenário 1 .....  | 67 |
| Figura 16 Distribuição temporal coerente das atividades recomendadas ao talhão 1 .....   | 68 |
| Figura 17 a) Quantidade de trabalho selecionada para as atividades de subsolagem, plantio e capina considerando o cenário 2; b) Quantidade de trabalho selecionada para as atividades de subsolagem, plantio e capina considerando o cenário 3 ..... | 70 |
| Figura 18 Resultados obtidos após o processamento do cenário 4 .....   | 73 |
| Figura 19 Distribuição semanal dos talhões a serem submetidos à atividade C, considerando a situação operacional I. ....   | 76 |
| Figura 20 Resultados observados após o processamento dos modelos .....   | 85 |
| Figura 21 Localização do planejamento tático de atividades silviculturais considerando a estrutura do planejamento florestal hierárquico .....   | 90 |

## **ANEXOS**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Cronograma de trabalho apresentando as semanas selecionadas pelo modelo de PL após a inclusão da restrição de dependência entre as atividades para a situação operacional I, conforme figura 16 (cenário 2) ..... | 96 |
|--|----|

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| Figura 2 | Cronograma de trabalho apresentando as semanas selecionadas pelo modelo de PL após a inclusão da restrição de disponibilidade de recursos para as situações operacionais I, II e III conforme figura 20 (cenário 3)..... | 97  |
| Figura 3 | Cronograma de trabalho apresentando as semanas selecionadas pelo modelo de PL após a imposição de metas semanais de produção para as situações operacionais I, II e III (cenário 4).....                                 | 98  |
| Figura 4 | Distribuição semanal dos talhões a serem submetidos à atividade A, considerando a situação operacional II.....   | 99  |
| Figura 5 | Distribuição semanal dos talhões a serem submetidos à atividade E, considerando a situação operacional III.....  | 100 |
| Figura 6 | Cronograma de trabalho das equipes selecionadas para a execução das onze atividades silviculturais considerando as três situações operacionais (cenário 4).....  | 101 |
| Figura 7 | Cronograma de trabalho das equipes selecionadas para a execução das onze atividades silviculturais considerando as três situações operacionais (cenário 5).....  | 102 |

## LISTA DE TABELAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabela 1  | Área total dos talhões que compõem a base de dados.....   | 36 |
| Tabela 2  | Distribuição dos talhões estudados por situação operacional.....  | 39 |
| Tabela 3  | Descrição da quantidade de recursos demandados por equipe, rendimentos por equipe e custos por atividade.....   | 36 |
| Tabela 4  | Descrição das horas efetivas de trabalho por recurso e atividade e sua quantidade máxima ofertada semanalmente .....  | 37 |
| Tabela 5  | Cenários testes de validação da eficácia dos modelos propostos .....  | 63 |
| Tabela 6  | Metas semanais, em área (ha), por situação operacional, simuladas no cenário 4 para utilizar a capacidade operacional máxima da empresa e para terminar o projeto o mais cedo possível..... | 72 |
| Tabela 7  | Áreas a serem realizadas da atividade C considerando os talhões associados à situação operacional I.....  | 75 |
| Tabela 8  | Áreas a serem realizadas da atividade A e E considerando os talhões associados às situações operacionais II e III.....  | 77 |
| Tabela 9  | Planejamento anual físico otimizado de atividades silviculturais, identificando a área (ha) a ser realizada de cada atividade ao longo do ano .....   | 82 |
| Tabela 10 | Planejamento anual financeiro otimizado de atividades silviculturais, identificando a previsão mensal de gastos (R\$) por atividade ao longo do ano.....                                    | 82 |
| Tabela 11 | Metas semanais, em área, por situação operacional, simuladas no cenário 9 .....   | 87 |
| Tabela 12 | Dados referentes ao processamento dos modelos desenvolvidos.....  | 88 |

## SUMÁRIO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....  | 13 |
| 2     | OBJETIVOS .....   | 16 |
| 2.1   | Objetivo geral .....  | 16 |
| 2.2   | Objetivos específicos .....   | 16 |
| 3     | DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....   | 17 |
| 4     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....   | 19 |
| 4.1   | Silvicultura .....  | 19 |
| 4.1.1 | Preparo de solo .....   | 20 |
| 4.1.2 | Plantio .....   | 22 |
| 4.1.3 | Adubação .....  | 23 |
| 4.1.4 | Tratos culturais .....  | 25 |
| 4.2   | Planejamento florestal .....  | 27 |
| 4.2.1 | Planejamento florestal estratégico .....                            | 28 |
| 4.2.2 | Planejamento florestal tático .....                                 | 29 |
| 4.2.3 | Planejamento florestal operacional .....                            | 30 |
| 4.3   | Pesquisa operacional .....  | 31 |
| 4.4   | Programação de projetos .....                                       | 33 |
| 5     | MATERIAL E MÉTODOS .....  | 35 |
| 5.1   | Área de estudo .....  | 35 |
| 5.2   | Definição das situações operacionais .....                          | 36 |
| 5.3   | Descrição e recomendação técnica de atividades silviculturais ..... | 39 |
| 5.4   | Geração do Plano Técnico de Atividades Silviculturais (PTAS) .....  | 44 |
| 5.5   | Rendimentos, custos e lucratividade mínima esperada .....           | 35 |
| 5.6   | Formulação matemática .....   | 39 |
| 5.6.1 | Programação Linear (PL) .....                                       | 39 |
| 5.6.2 | Programação Linear Inteira (PLI) .....                              | 52 |
| 5.7   | Cenários propostos .....  | 62 |
| 5.8   | Processamento e comparação dos cenários .....                       | 63 |
| 6     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 65 |
| 6.1   | Modelo de Programação Linear (PL) .....                             | 65 |
| 6.2   | Modelo de Programação Linear Inteira (PLI) .....                    | 83 |
| 7     | CONCLUSÕES .....  | 91 |
|       | REFERÊNCIAS .....   | 92 |
|       | ANEXOS .....  | 96 |

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é uma importante fonte de matéria-prima para diversos segmentos industriais como os setores de celulose e papel, siderurgia, bioenergia e produtos de madeira serrada. Devido à vasta aplicação industrial deste recurso, as florestas naturais representaram nas últimas décadas, no Brasil e no mundo, uma importante fonte dessa matéria prima, e por isso, estes biomas vêm sofrendo constantes pressões exploratórias.

A conscientização da sociedade para a necessidade de manutenção das florestas remanescentes e, principalmente, a utilização de processos industriais sustentáveis exigidos por organizações internacionais de certificação, tem direcionado e estimulado o consumo consciente de produtos e serviços que utilizam fontes renováveis de matéria prima.

Além de reduzirem as pressões sobre as florestas nativas e serem capazes de fornecer madeira com características técnicas adequadas e específicas às diversas aplicações industriais, as florestas plantadas atuam como sumidouros de carbono da atmosfera, contribuindo para a mitigação do fenômeno do aquecimento global.

Neste contexto, o plantio de florestas para fins industriais tem recebido grande ênfase no direcionamento de investimentos florestais no Brasil. Devido, principalmente, às condições edafoclimáticas e o domínio de técnicas de produção florestal, o Brasil tem atraído investimentos significativos voltados para a implantação de florestas.

A aplicação otimizada destes investimentos exige a utilização de técnicas sofisticadas de auxílio à tomada de decisão. Lucros cada vez mais reduzidos, restrições técnicas, sociais e ambientais cada vez mais constantes desafiam a capacidade de planejamento dos gestores florestais.

Nesse sentido, técnicas de programação linear podem ser aplicadas para viabilizar o planejamento operacional de atividades silviculturais, buscando sempre otimizar a alocação dos recursos. Através da utilização desses métodos, o gestor silvicultural torna-se capaz de estabelecer o arranjo combinatório ótimo para seguir um regime silvicultural, que represente todas as características do negócio silvicultural. As restrições características do processo silvicultural são representadas pela limitação de recursos (máquinas, mão-de-obra, financeiro), pela relação de dependência entre as atividades silviculturais e pela necessidade de cumprimento de metas periódicas de plantio.

As técnicas de programação de projetos permitem aos gestores florestais realizarem a programação de atividades dependentes, considerando a disponibilidade limitada de recursos. A representação dessas características durante o processo de planejamento de atividades silviculturais é essencial para viabilizar uma produção silvicultural constante, de forma a não exaurir os recursos necessários para a realização das atividades.

O conceito da regulação florestal, apesar de estar voltado, principalmente, para o manejo do recurso florestal (madeira) gerando produções volumétricas constantes em área e volume ao longo de um horizonte de planejamento (LEUSCHENER, 1984), pode ser aplicado ao processo silvicultural. Analogamente, a regulação silvicultural pode ser associada, à elaboração de planos silviculturais que viabilizem plantios constantes ao longo do tempo, levando-se em conta as restrições técnicas e operacionais intrínsecas ao processo silvicultural.

Nesse sentido, uma área florestal regulada, do ponto de vista silvicultural, apresenta execuções equilibradas em área (ha) de trabalho por atividade, respeitando as relações de dependência entre as mesmas, bem como a disponibilidade de recursos. Este panorama resulta em demandas regulares de

mão-de-obra, máquinas, equipamentos e insumos, favorecendo significativamente a gestão do negócio silvicultural.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver modelos de programação linear e linear inteira que suportem o processo de elaboração de planos anuais de atividades silviculturais, de modo a dimensionar equipes com o intuito de minimizar o custo de execução de atividades, gerando ainda um sequenciamento das atividades a serem realizadas.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Elaborar planos anuais físicos e financeiros de atividades silviculturais considerando restrições técnicas, operacionais e metas de execução;
- b) Abordar aspectos associados à lucratividade de projetos silviculturais;
- c) Considerar múltiplos modos de formar equipes operacionais de atividades silviculturais durante a elaboração do planejamento anual destas atividades;
- d) Comparar a abordagem na Programação Linear e Programação Linear Inteira dos modelos desenvolvidos;
- e) Discutir o conceito de “Regulação Silvicultural” no âmbito de execução de atividades.

### 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema a ser retratado nesse trabalho está relacionado com a elaboração do planejamento anual físico e financeiro de atividades silviculturais, sendo descrito no fluxograma apresentado na Figura 1.

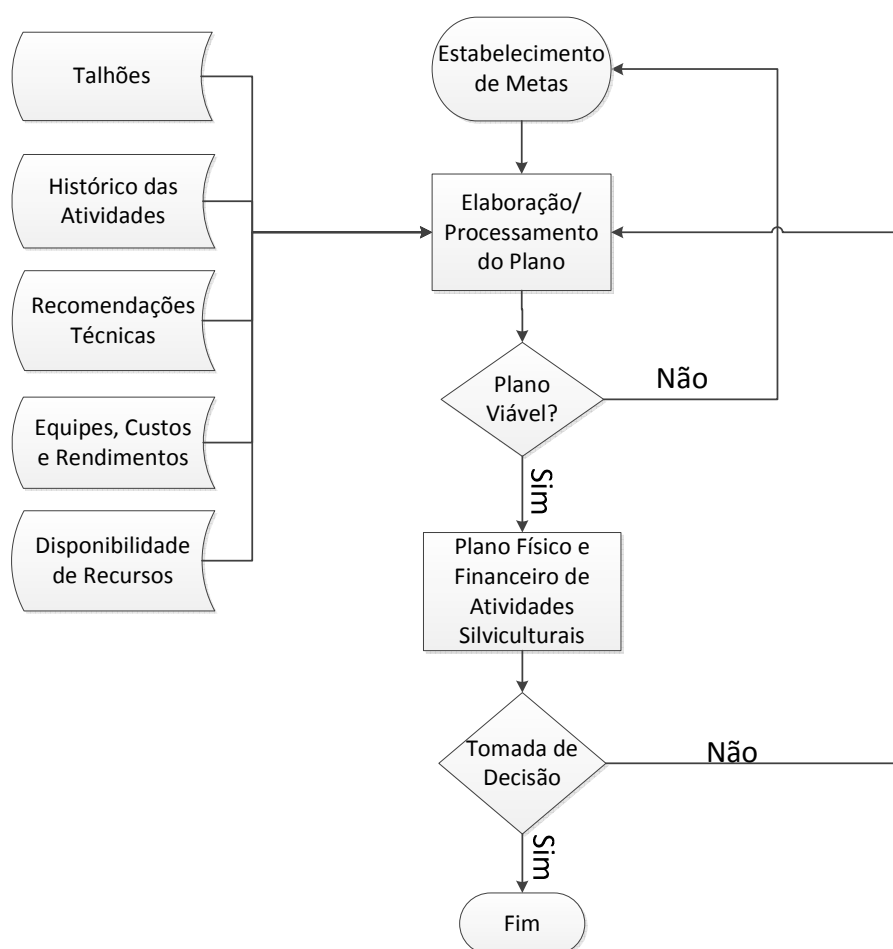


Figura 1 Fluxograma dos processos relacionados ao planejamento anual de atividades silviculturais

A etapa inicial do processo de elaboração de planos anuais de atividades silviculturais é representada pelo estabelecimento das metas anuais de plantio. Esta definição é desempenhada por profissionais alinhados com os objetivos estratégicos da empresa, normalmente gestores florestais situados no nível de diretoria e gerência florestal.

A partir da definição das metas anuais de plantio, recorre-se a uma base cadastral da empresa contendo: a) histórico de atividades já realizadas nos talhões, b) recomendações técnicas explicitando os intervalos que precisam ser respeitados entre as atividades, c) dados operacionais das equipes de campo com suas possíveis formações, seus rendimentos e custos e, finalmente, d) identificação da quantidade de recursos disponíveis para a realização das atividades silviculturais. Reunidas estas informações, o planejamento anual das atividades silviculturais pode ser elaborado.

Uma vez processado o plano, é necessário avaliar a viabilidade do mesmo, ou seja, é preciso verificar se a previsão dos custos está de acordo com o orçamento disponibilizado, se a demanda dos recursos está coerente com a disponibilidade dos mesmos. Além disso, é necessário certificar se as recomendações técnicas das atividades e as metas pré-estabelecidas foram respeitadas.

Caso os pré-requisitos do plano sejam alcançados, esse pode ser aprovado e comparado com outras opções, até a tomada de decisão. Havendo inviabilidade financeira ou técnica do plano elaborado, novos cenários devem ser elaborados até que todos os objetivos e restrições sejam atendidos. O plano elaborado pode ser reformulado ou reprocessado até que todas as variáveis envolvidas no processo sejam apreciadas. Esta possibilidade é determinante para a gestão de projetos silviculturais, pois usualmente, os planos sofrem constantes alterações geradas por distúrbios climáticos, indisponibilidade de mão-de-obra, quebra de máquinas, entre outros.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Silvicultura

O termo Silvicultura provém do latim, em que *silva* significa floresta e *cultura*, cultivo de árvores (CORRÊA, 2009). De acordo com Binkowski (2009), a Silvicultura pode ser definida com uma ciência “destinada ao estudo dos métodos naturais e artificiais de regenerar e melhorar os povoamentos florestais, visando às necessidades do mercado e à manutenção, ao aproveitamento e ao uso racional das florestas (nativas ou comerciais)”.

A indústria de base florestal utiliza como principal fonte de matéria-prima, florestas plantadas, especialmente espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Nesse contexto, a aplicação de técnicas silviculturais avançadas garante o fornecimento sustentado de matéria prima renovável à indústria de transformação da madeira. A silvicultura, portanto, pode ser considerada como mecanismo indispensável para a sustentabilidade dos empreendimentos florestais.

A silvicultura é composta por um conjunto de atividades, que devem ser realizadas de forma sequencial, ou seja, as atividades silviculturais apresentam caráter de interdependência. A realização dessas diversas atividades está associada à disponibilidade de recursos, sendo esses indispensáveis para a execução das operações silviculturais (FERREIRA; SILVA, 2008).

Esses recursos podem ser classificados como renováveis ou não renováveis. As máquinas e a mão-de-obra representam recursos renováveis já que, após o término da atividade que foram alocados, esses recursos voltam a estar disponíveis para utilização. Recursos não renováveis são exauridos durante a utilização dos mesmos e, portanto, não podem ser utilizados. (NUDTASOMBOOM; RANDHAWA, 1997). Recursos não

renováveis considerando o contexto florestal são representados pelos insumos, como fertilizantes, combustíveis, mudas, dentre outros.

#### **4.1.1 Preparo de solo**

Os primeiros florestamentos realizados nas décadas de 60 e 70 aplicaram métodos convencionais de preparo do solo, usados em áreas agrícolas (culturas anuais). O preparo primário do solo era realizado com arado (de disco ou aiveca) e grade leve ou, em solos leves (textura arenosa ou média), usava-se a grade pesada. A concepção vigente era que as espécies florestais precisavam de um preparo intensivo do solo, com ganhos de produtividade que justificassem os custos operacionais (FERREIRA; SILVA, 2008).

De acordo com Ferreira e Silva (2008), o sistema mais utilizado, a partir da década de 80, tem sido o cultivo mínimo, onde se observa uma tendência de diminuição progressiva do uso de máquinas e crescente uso de herbicidas. Nesse caso, as operações resumem-se em aplicação de herbicidas sobre toda área, subsolagem ou coveamento e aplicação de herbicidas pré-emergentes nas linhas de plantio.

A operação de coveamento substitui a subsolagem em áreas muito declivosas ou com muitos obstáculos físicos ao subsolador, como em áreas em reforma, com muitos tocos grossos (GONÇALVES; STAPE, 2002). O preparo do solo é uma operação cara, que em condições de relevo desfavorável, pode provocar erosão.

A subsolagem é a principal atividade realizada durante o preparo do solo. Segundo Gonçalves e Stape (2002), o rendimento médio da subsolagem, considerando o espaçamento de plantio de 3,0 m na entrelinha, utilizando-se trator com potência de 80 HP, varia de 1,5 a 2,0 hm/ha (hora máquina/hectare). A distância de 3,0 m entre as linhas de plantio é recomendada para possibilitar o

trânsito de tratores na floresta plantada. Na linha de plantio, o espaçamento entre as plantas pode variar de um a três metros, dependendo do manejo florestal e da qualidade genética do material (SILVA; ANGELI, 2006).

O custo operacional, considerando rendimentos médios, aproximou-se de R\$25,00/hora no início do ano 2000. A operação de coveamento, utilizando-se de um trator de 60 HP, nessas mesmas condições, resultou em um rendimento de 3,5 a 4,5 hm/ha. O custo do coveamento aproximou-se de R\$ 80,00/ha superando o custo da subsolagem para as condições avaliadas por Gonçalves e Stape (2002).

Segundo Ferreira e Silva (2008), o preparo do solo tem sido considerado uma técnica que propicia ganhos em produtividade, pois favorece o estabelecimento do sistema radicular e o bom desenvolvimento da planta. Segundo recomendações técnicas, o preparo de solo pode ser consorciado com adubação, devendo ser realizado, no máximo, dez dias antes do plantio e não pode ser realizado sem que o combate às formigas cortadeiras tenha sido concluído. A figura 2 ilustra a operação de subsolagem combinada com adubação.



Figura 2 Operação de subsolagem combinada com adubação

Fonte Oliveira (2011).

#### **4.1.2 Plantio**

O plantio é uma das operações mais importantes para o sucesso da implantação de povoamentos florestais. A muda é o principal insumo necessário à realização do plantio. Segundo Silva e Angeli (2006), para serem levadas ao campo, as mudas devem estar bem desenvolvidas (aproximadamente 25 cm de altura) e com caules firmes. Mudas muito tenras ou estioladas (finas e compridas, com poucas folhas) sofrem mais quando levadas ao campo e expostas ao sol, podendo apresentar alto índice de mortalidade.

Atrasos no plantio das mudas podem causar o enovelamento do sistema radicular, no interior dos tubetes, afetando significativamente a qualidade do plantio. As mudas são muito sensíveis ao sol e ao vento e ressecam-se com muita facilidade (FERREIRA; SILVA, 2008).

De acordo com Silva e Angeli(2006), áreas que foram subsoladas podem ser plantadas de forma mecanizada utilizando plantadeiras específicas, desde que sejam usadas mudas produzidas em tubetes. Em outras condições, é necessária a abertura de covas e o plantio deve ser realizado manualmente. A muda deve ser colocada com o coleto ao nível do solo e, logo após o plantio, o solo deve ser pressionado ao redor da muda para não deixar bolsões de ar. A figura 3 apresenta a realização do plantio mecanizado, garantindo precisão no alinhamento e espaçamento de plantio.



Figura 3 Operação de plantio mecanizado através de equipamento específico

Fonte: Oliveira (2011)

A irrigação, etapa posterior ao plantio, é recomendada principalmente em períodos secos, bem como em eventos de seca superior a quatro e sete dias, para mudas provenientes, respectivamente, de tubete e saco plástico. Uma alternativa para a diminuição dos custos de irrigação é o uso do gel. Esse deve ser aplicado seco na cova de plantio ou em volta do torrão da muda, ou ainda, pré-hidratado na cova de plantio. Se aplicado seco, deve ser hidratado logo após o plantio, sendo então necessária a realização da irrigação (SILVA; ANGELI, 2006).

#### **4.1.3 Adubação**

A necessidade da adubação baseia-se do fato de que o solo não é capaz de fornecer todos os nutrientes dos quais as plantas precisam para seu adequado crescimento. Isso ocorre porque os solos usados para os plantios florestais são muito intemperizados e lixiviados pelo contínuo processo de exportação de nutrientes, devido às diversas rotações de culturas agrícolas ou florestais. As características e quantidade de adubos a serem aplicados dependem das



necessidades nutricionais da espécie, da fertilidade do solo, da reação dos adubos com o solo, da eficiência dos adubos e de fatores de ordem econômica (SILVA; ANGELI, 2006).

As adubações recomendadas durante a implantação de um povoamento florestal podem ser realizadas antes, durante ou após o plantio. A realização dessas operações irá depender da existência de equipamentos adequados para a sua execução, conforme as recomendações técnicas. As adubações direcionadas para as fertilizações das mudas, no ato do plantio, são normalmente denominadas de adubações de base. As fertilizações realizadas após o plantio das mudas são denominadas adubações de cobertura. A figura 4 ilustra adubação de cobertura mecanizada realizada após o plantio do povoamento florestal.



Figura 4 Exemplo ilustrativo da realização da atividade de adubação de cobertura mecanizada

Fonte Oliveira (2011)

A análise do solo constitui a forma mais prática e viável para avaliar as necessidades nutricionais do solo e assim é bastante utilizada para definir as adubações a serem aplicadas no povoamento (SILVA; ANGELI, 2006).

Apesar das recomendações de adubação variarem de acordo com as condições do sítio, alguns elementos são indicados frequentemente devido à sua importância para o desenvolvimento da planta. Esses elementos indispensáveis ao desenvolvimento das plantas são denominados macronutrientes. Os principais representantes deste grupo são o nitrogênio, o fósforo e o potássio. Os elementos necessários à manutenção da vida da planta sendo demandados em menores quantidades pelas plantas são denominados micronutrientes. Alguns representantes deste grupo de nutrientes são boro, cloro, cobre, manganês, zinco, molibdênio e ferro.

#### **4.1.4 Tratos culturais**

As operações que buscam beneficiar e manter o povoamento florestal são chamadas de tratos culturais. Não se considera trato cultural o corte de regeneração ou qualquer forma de manejo do solo (FERREIRA; SILVA, 2008).

Durante, principalmente os dois primeiros anos após o plantio das mudas, tratos culturais precisam ser realizados para assegurar a sobrevivência e o desenvolvimento das futuras árvores (FERREIRA; SILVA, 2008). O controle às formigas e às plantas invasoras (capinas) que competem por luz e nutrientes, com a cultura principal, são as atividades mais importantes para garantir boas condições de desenvolvimento de mudas de *Eucaliptus* sp.

As formigas cortadeiras, especialmente as saúvas, podem causar danos significativos às mudas afetando todo o desenvolvimento da floresta. As formigas devem ser controladas sempre que necessário, sendo fundamental o combate nos dois primeiros anos após plantio (FERREIRA; SILVA, 2008).

Segundo Boaretto e Forti (1997), o combate às formigas cortadeiras deve ocorrer 30 dias antes do plantio, sendo realizado de forma sistemática e de forma localizada anualmente, após o plantio. O método mais indicado atualmente é o uso de iscas de sulfuramida, aplicadas com porta-iscas. O consumo de iscas depende do grau de infestação dos formigueiros na área. A figura 5 apresenta um combate localizado de formigas saúva voltado para a manutenção do povoamento.



Figura 5 Foto ilustrativa da operação de combate localizado às formigas cortadeiras

Fonte Oliveira (2011)

De acordo com Ferreira e Silva (2008), o controle às plantas competidoras deve ser realizado em intervalos curtos de tempo, geralmente de 2 a 4 vezes no ano, sendo a primeira normalmente 60 dias após o plantio.

## 4.2 Planejamento florestal

O planejamento é a elaboração, por etapas, com bases técnicas, de planos e programas com objetivos bem definidos. É a arte e a ciência de projetar, em uma base racional, cursos futuros de ação para indivíduos, grupos ou corporações. A sobrevivência de longo prazo de qualquer organização está fortemente associada ao planejamento, pois ajuda a determinar a forma ótima de alocar recursos escassos entre oportunidades de lucro (MACHADO; LOPES, 2008).

O planejamento apresenta-se como uma ferramenta imprescindível para o processo de tomada de decisão, sendo este indispensável à sustentabilidade de empreendimentos florestais (BANHARA, 2009). A realização do planejamento se justifica pelas importantes funções que desempenha no gerenciamento do empreendimento como: a previsão, a simulação, a execução, a coordenação e o controle (LAUFER et al., 1987).

Um conceito mais amplo sobre planejamento florestal afirma que o planejamento está voltado para a definição de metas de produção, para períodos de tempo definidos, considerando previsões do mercado (preço e demanda), estoque e recursos disponíveis (GOMIDE, 2009).

O planejamento florestal está organizado de forma hierárquica, em três níveis, sendo o estratégico, tático e operacional, os quais se diferenciam pelo escopo e atividades distintas. Os objetivos e planos, gerados em cada nível, devem ser consistentes e apoiados nos demais níveis, tornando-se mais detalhistas e considerando períodos menores de tempo a medida que o planejamento caminha do nível estratégico para o operacional (BATEMAN; SNELL, 1998; MACHADO; LOPES, 2008; BASKENT; KELES, 2005). O Fluxograma da figura 1 ilustra a estrutura hierárquica do planejamento florestal.

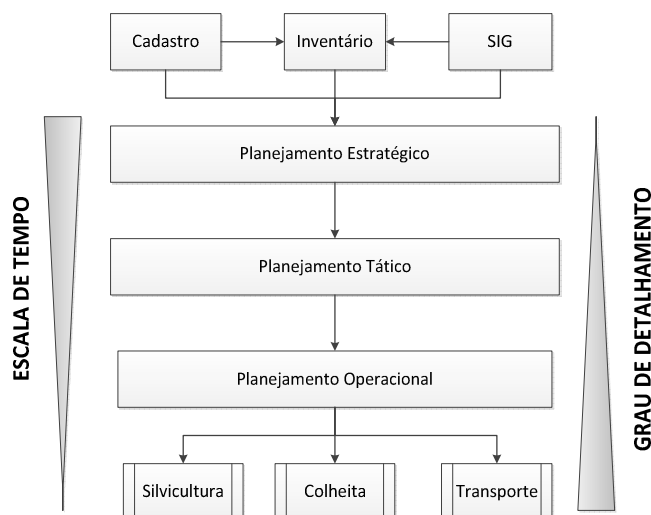


Figura 6 Fluxograma da estrutura hierárquica de funcionamento do planejamento florestal

Fonte: Adaptado de GOMIDE (2009)

#### 4.2.1 Planejamento florestal estratégico

O planejamento florestal estratégico pode ser considerado a essência da ciência florestal tradicional, iniciada na Europa no século XIX. A regulação da produção florestal já se apresentava como uma preocupação dos profissionais responsáveis pela produção de madeira naquele continente. (MARTELL; GUN; WEITRAUB, 1998).

De acordo com Bateman e Snell (1998), o planejamento estratégico pode ser caracterizado como a tomada de decisões sobre os objetivos e estratégias a longo prazo. Esses objetivos constituem os alvos principais ou resultados finais, os quais se referem à sobrevivência, ao valor e ao crescimento da organização. Já a estratégia se refere ao padrão de ações e alocação de recursos destinados a atingir os objetivos, o que implica na tentativa de

equilibrar atividades e recursos com as oportunidades encontradas no ambiente externo.

O planejamento florestal estratégico consiste em elaborar um plano de manejo sob um horizonte de longo prazo, normalmente de quinze a vinte e um anos para plantações florestais no Brasil e América do Sul. Com base em critérios técnico-econômicos são elaborados diferentes cenários, nos quais são apresentadas as alternativas de manejo, os volumes a serem gerados e os talhões disponíveis para cada operação florestal em cada ano do horizonte. (BANHARA, 2009).

#### **4.2.2 Planejamento florestal tático**

O nível tático de planejamento tem como base os objetivos e resultados obtidos durante o planejamento estratégico, porém uma escala menor de tempo é considerada. Neste nível de planejamento, são focadas as principais ações a serem empreendidas por cada unidade da empresa, para que sejam realizadas suas respectivas partes no plano estratégico (BATEMAN; SNELL, 1998).

O horizonte de planejamento normalmente considerado no planejamento tático situa-se, normalmente, entre um a cinco anos. Nesse período, os objetivos estratégicos são traduzidos em metas mensais ou anuais, onde são decididas as medidas que devem ser realizadas, bem como os meios a serem utilizados para atingir estes objetivos (BANHARA, 2009).

Segundo Machado e Lopes (2008), as principais definições abordadas pelo planejamento tático referem-se ao sequenciamento das operações de colheita, ao dimensionamento de recursos e equipamentos a serem utilizados, com base em custos e rendimentos. Refere-se ainda à identificação de áreas críticas para a operação de colheita e ao estabelecimento de melhorias da malha viária necessárias para o escoamento da produção.

Aspectos espaciais do planejamento florestal estão ganhando atenção ao longo dos anos, principalmente em se tratando das interações entre a vizinhança das unidades de manejo (GOMIDE, 2009). Devido aos possíveis impactos ambientais gerados pela colheita de extensas áreas contíguas, a inclusão de restrições espaciais durante o planejamento tático, tem recebido bastante atenção.

As restrições espaciais de adjacência são normalmente classificadas em duas maneiras: URM e ARM. De acordo com Murray (1999), a restrição *Unit Restriction Model* tem como característica a proibição simultânea em duas áreas adjacentes, garantindo que as áreas a serem colhidas não ultrapassem um limite mínimo para áreas contíguas de corte. A desvantagem deste tipo de restrição está associada ao elevado número de inequações desenvolvidas para retratar todo o problema (GOMIDE, 2009). O modelo *Area Restriction Model* tem como ideia permitir a colheita de talhões vizinhos, desde que o somatório total de suas áreas não ultrapasse a área máxima permitida. Este tipo de restrição espacial é empregado quando não se deseja que o somatório das áreas de talhões vizinhos seja superior ao limite máximo de área permitida na colheita florestal. Esta flexibilidade não é observada no modelo URM (GOMIDE, 2009).

#### **4.2.3 Planejamento florestal operacional**

O planejamento operacional utiliza como base os resultados do planejamento tático, apresentando a função de identificar os procedimentos e processos específicos requeridos aos níveis inferiores da organização, sendo elaborados planos com horizontes curtos de tempo, focalizando tarefas rotineiras (BATEMAN, SNELL, 1998).

As principais decisões desse nível de planejamento se referem à seleção e alocação das equipes e maquinário para a realização das operações florestais,

seleção da época de realização das atividades, dentre outros (CHURCH; MURRAY; WEINTRAUB, 1998).

O planejamento operacional retrata as operações que ocorrem semanalmente ou diariamente, e está relacionado com as informações advindas do planejamento tático e estratégico (GOMIDE, 2009).

Segundo Dykstra (1984), o ambiente em que a decisão pelo melhor modelo operacional está imerso é tão complexo, que soluções intuitivas, sem a análise de todas as possibilidades, não são capazes de gerar conhecimento e informação que suporte o processo de tomada de decisão.

### **4.3 Pesquisa operacional**

O surgimento da Pesquisa Operacional está associado ao estudo de métodos capazes de resolver problemas de operações militares (MEDRI, YOTSUMOTO, 2009). Durante a segunda guerra mundial (1939-1945), um dos grandes desafios esteve relacionado com a alocação efetiva de recursos militares (soldados, armas, comida) dentre as diversas operações desempenhadas na época. Diante dessas dificuldades, os exércitos britânico e americano convocaram cientistas para desenvolver uma abordagem científica que retratasse problemas relacionados às operações militares. De fato, o grupo de cientistas foi convocado para realizar *pesquisas em operações (militares)*. Esses cientistas formaram a primeira equipe de Pesquisa Operacional (HILLIER; LIEBERMAN, 2005).

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. Embora os modelos matemáticos representem a base para a pesquisa operacional, o trabalho consiste mais em resolver um problema do que em construir e resolver modelos



matemáticos. Os problemas de decisão incluem, com frequência, fatores intangíveis para o planejador, tais como condições econômicas de mercado e variações ambientais. Para poder representar estes fatores em termos de modelos matemáticos se requer uma grande habilidade por parte do planejador (TAHA, 1994).

Dentro da pesquisa operacional, a Programação Linear (PL) é uma das mais antigas técnicas e continua a ser a mais utilizada atualmente. Com o avanço da tecnologia, computadores e softwares mais avançados, tornou-se possível a construção e resolução dos problemas lineares que até então eram mais difíceis ou impossíveis (KEYS, 1995).

Segundo Hillier e Lieberman (2005), a programação linear é um método indicado para tratar de problemas de otimização envolvendo restrições, além de permitir a análise de problemas de alocação ótima de recursos limitados entre atividades competitivas. Neste contexto, a programação linear vem sendo aplicada na solução de problemas de otimização envolvendo o manejo de plantações florestais. Ronnqvist (2003) apresenta exemplos de diversas aplicações da pesquisa operacional no setor florestal. Planos de abastecimento para a indústria de papel e celulose e formas de otimização das operações de transporte, colheita e serragem de toras são abordadas.

A programação linear é bastante utilizada em “situações de tomadas de decisão” que necessita a escolha de uma das opções, dentre muitas. Essa técnica pode ser aplicada em problemas que permitem a definição de um objetivo em termos quantitativos (RODRIGUEZ, 1987). Os problemas de PL envolvem a otimização de uma função linear (função objetivo) sujeita a restrições lineares que pode ser expressa em equações ou inequações (GOLDFARB; TODD, 1989).

#### 4.4 Programação de projetos

Problemas de programação de projetos envolvem programar ao longo do tempo atividades que necessitam de recursos para serem concluídas. Essa programação também deve levar em conta restrições de precedência entre as atividades, isto é, certas atividades só podem ser iniciadas após outras terem sido terminadas (YAMASHITA; MORABITO, 2007). Os autores apresentam, neste mesmo trabalho, diversas aplicações da programação de projetos em diferentes segmentos tais como construção civil, manufatura, telecomunicações, desenvolvimento de *software/computação* e manutenção de aeronaves.

O planejamento de operações florestais pode, por exemplo, envolver a alocação de recursos escassos à tarefas individuais. Esses recursos, muitas vezes, precisam ser compartilhados entre as tarefas. A alocação destes recursos direcionados à realização de tarefas ao longo do tempo, com a finalidade de otimizar um ou múltiplos objetivos é conhecido como *scheduling* (VALENZUELA; BALCI; MCDONALD, 2002 ). Ainda segundo os autores, o objetivo mais comum de um problema de programação de projetos consiste em determinar como alocar recursos por tarefas, de modo a minimizar o término da última atividade (*makespan*). Além disso, outros objetivos também podem ser perseguidos como maximizar a utilização de recursos ou ainda minimizar o custo total do projeto.

A técnica PERT/CPM é uma das principais ferramentas utilizadas para a gestão do tempo e de recursos em projetos, nos quais as atividades são interdependentes (BUONGIORNO; GILLESS, 2003). Enquanto o método CPM traz uma abordagem determinística, o PERT calcula as datas pessimistas, prováveis e otimistas dando um tratamento probabilístico às durações das atividades (FERREIRA, 2005). Entretanto, o método PERT/CPM não permite

levar em conta a disponibilidade de recursos, isto é, tem a premissa de que os recursos são ilimitados, o que não corresponde à realidade (DIMANDE, 2011).

Segundo Valenzuela, Balci e McDonald (2002), uma variação mais realista do Método do Caminho Crítico (CPM) é o *Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)*. Yamashita e Morabito (2007) denominam este problema como Problema de programação de projetos com Custo de Disponibilidade de Recursos (PCDR). Logo, quando diferentes formações de equipes são consideradas, esse problema passa a ser denominado de Problema de programação de projetos com Custo de Disponibilidade de Recursos e Múltiplos Modos de Execução (PCDRMM).

Devido às características do negócio silvicultural, como a disponibilidade limitada de recursos e a necessidade de respeito às relações de dependência entre as atividades, os Problemas de programação de projetos com Custo de Disponibilidade de Recursos e Múltiplos Modos de Execução (PCDRMM) podem ser aplicados na geração de planos otimizados de atividades silviculturais.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Área de estudo

O projeto florestal base desse estudo refere-se a uma área de produção pertencente a uma empresa do setor florestal. A área de estudo está localizada na região Norte do estado de Minas Gerais. A área total efetiva compreende 1.278,39 ha, distribuídos em 36 talhões conforme disposto na Figura 7.

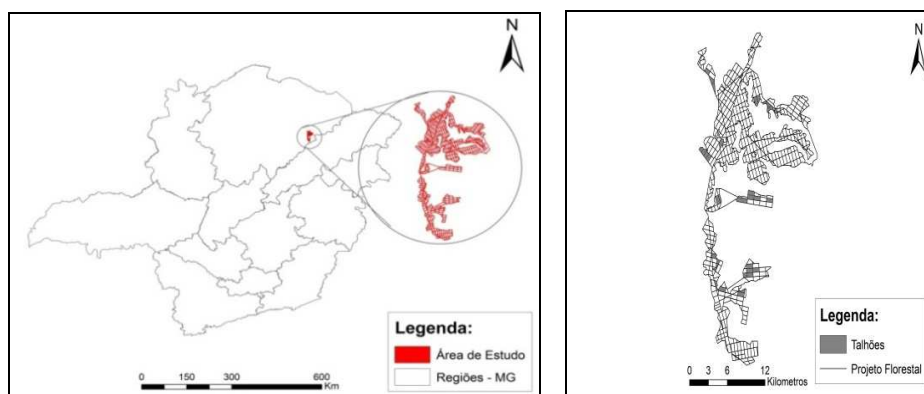


Figura 7 Mapa de localização da área de estudo contendo a distribuição espacial dos talhões que a compõem

A distribuição dispersa dos talhões ilustrada na figura 7 ocorreu devido à liberação gradual das áreas, por parte do antigo proprietário da fazenda. Dessa forma, a implantação da nova floresta foi realizada à medida que os talhões eram liberados. Portanto, as atividades a serem executadas nos talhões variaram espacialmente no projeto, em virtude de seu histórico. A área total de cada um dos talhões considerados é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 Área total dos talhões que compõem a base de dados

| Talhão | Área (ha) | Talhão | Área (ha) | Talhão | Área (ha) |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| 1      | 48,06     | 13     | 20,49     | 25     | 36,55     |
| 2      | 25,29     | 14     | 17,24     | 26     | 36,80     |
| 3      | 20,52     | 15     | 42,95     | 27     | 84,35     |
| 4      | 50,57     | 16     | 35,93     | 28     | 50,30     |
| 5      | 21,24     | 17     | 40,35     | 29     | 49,59     |
| 6      | 50,76     | 18     | 37,43     | 30     | 47,37     |
| 7      | 23,81     | 19     | 22,63     | 31     | 3,21      |
| 8      | 48,98     | 20     | 9,47      | 32     | 50,48     |
| 9      | 50,99     | 21     | 12,02     | 33     | 50,26     |
| 10     | 33,66     | 22     | 27,05     | 34     | 50,17     |
| 11     | 15,04     | 23     | 50,72     | 35     | 36,57     |
| 12     | 24,23     | 24     | 34,08     | 36     | 19,23     |

## 5.2 Definição das situações operacionais

As informações históricas de cada um dos 36 talhões foram obtidas através do acesso à base cadastral da empresa. A partir dessa base, foi identificada, para cada talhão, a última atividade silvicultural implementada, sendo essa análise classificatória, definida como situação operacional.

Os planos operacionais elaborados anualmente devem integrar-se de forma cronológica e técnica. Portanto, o planejamento anual de atividades silviculturais é um processo contínuo já que a realização de determinada atividade em um talhão no ano corrente (t) depende da finalização de atividades realizadas no mesmo talhão no ano anterior (t-1). Atividades executadas em um determinado talhão no ano corrente (t) direcionadas para a liberação do plantio nesse mesmo local no ano seguinte (t+1) tem o objetivo de “antecipar” áreas, integrando planos silviculturais anuais.

Nesse sentido, de acordo com o histórico das atividades silviculturais realizadas nos talhões estudados, três situações operacionais distintas foram identificadas, a saber:

- a) Situação Operacional I: áreas em que a última atividade realizada foi a limpeza de resíduos, gerados a partir da colheita, e que precisam ser plantadas no ano corrente (t);
- b) Situação Operacional II: áreas em que a última atividade realizada foi a limpeza de resíduos, gerados a partir da colheita, e que precisam ser preparadas no ano corrente (t), para que o plantio possa ocorrer no próximo ano (t+1);
- c) Situação Operacional III: áreas em que a última atividade realizada foi o segundo combate às formigas e que precisam ser plantadas no ano corrente (t).

A figura 8 apresenta a distribuição espacial dos 36 talhões de acordo com a situação operacional de cada um deles.

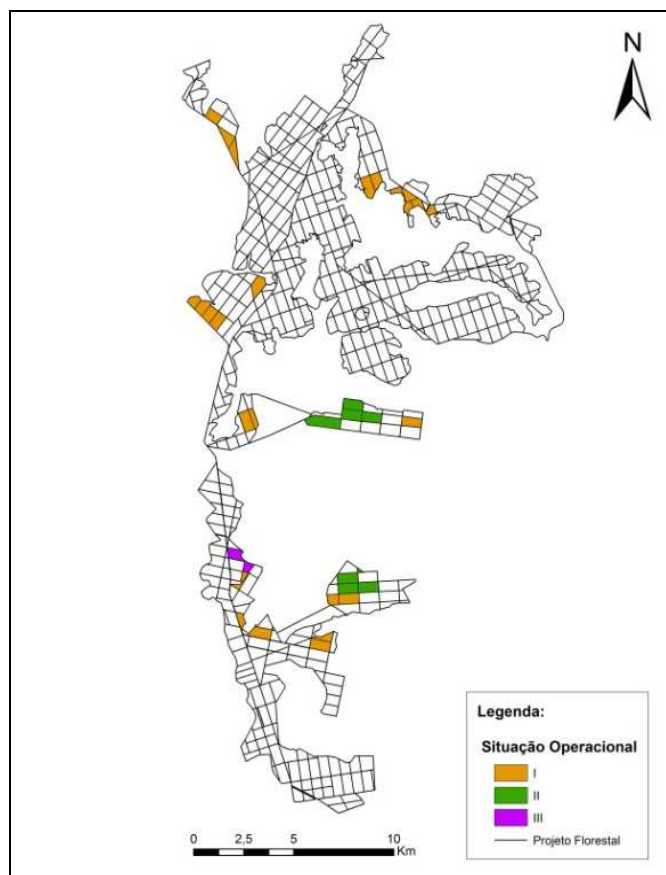


Figura 8 Distribuição espacial dos 36 talhões por situação operacional definida

A identificação e a quantidade de talhões (N) por situação operacional é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 Distribuição dos talhões estudados por situação operacional

| Situação Operacional | Talhões | N  | Área Total (ha) | Última Atividade Realizada | Integra Planos? |
|----------------------|---------|----|-----------------|----------------------------|-----------------|
| I                    | 1- 26   | 26 | 836,86          | Limpeza de Resíduos        | Não             |
| II                   | 27- 34  | 8  | 385,73          | Limpeza de Resíduos        | Sim             |
| III                  | 35- 36  | 2  | 55,8            | 2º Combate às Formigas     | Não             |

### 5.3 Descrição e recomendação técnica de atividades silviculturais

Após o conhecimento das situações operacionais de cada talhão, faz-se necessário selecionar e caracterizar as atividades silviculturais a serem realizadas nos mesmos.

Assim, optou-se por utilizar 11 (onze) atividades silviculturais relacionadas com implantação e reforma de povoamento de *Eucalyptus sp.* A partir da identificação das situações operacionais I, II e II, um conjunto de atividades silviculturais a serem aplicadas por situação operacional foi recomendado pela empresa. A identificação e descrição das 11 atividades são apresentadas a seguir:

**A- 1º Combate Manual às Formigas – Localizado:** o controle de formigas cortadeiras tem como objetivo evitar ou minimizar os danos de produção das florestas ocasionados pela desfolha das árvores. Está voltada para a preparação de talhões, permitindo a realização do plantio no ano seguinte. A aplicação do produto é realizada somente nos olheiros e, ou, carreiros identificados na área. Trata-se de uma atividade manual, na qual se utiliza o recurso mão-de-obra.



**B- 2º Combate Manual às Formigas– Sistemático:** apresenta as mesmas características da atividade A, porém, a aplicação do produto é realizada sistematicamente na área, seguindo uma distância específica, independentemente da identificação de formigueiros. Esta atividade é realizada após a atividade A, normalmente entre 10 e 15 dias, dependendo da recomendação técnica considerada.

**C- 1º Combate Manual às Formigas – Localizado:** apresenta as mesmas características da atividade A, porém, é realizada no mesmo ano do plantio. Portanto, esta atividade não está voltada para a preparação de áreas para o ano seguinte.

**D- 2º Combate Manual às Formigas – Sistemático:** apresenta as mesmas características da atividade B, porém, é realizada no mesmo ano do plantio. Portanto, esta atividade não está voltada à preparação de área para o ano seguinte.

**E- Subsolação Mecanizada com Adubação:** esta forma de preparo de solo consiste no revolvimento mecanizado do solo na linha de plantio, visando garantir a qualidade da operação de plantio e o bom estabelecimento e desenvolvimento da planta. À medida que o revolvimento do solo ocorre, adubações de fosfato natural e cloreto de potássio (KCL) são aplicadas em profundidade específicas do solo. A subsolação deve ser realizada 21 dias após o término da atividade B. Tratores de 180 cv de potência devem ser utilizados para a realização desta atividade.

**F- Plantio Manual:** a operação de plantio consiste no ato de colocar as mudas no solo, respeitando um espaçamento pré-estabelecido e critérios técnicos

de qualidade. O intervalo de tempo recomendado, entre o término da atividade antecedente e início do plantio, depende da época do ano. Durante o período chuvoso, o plantio deve ser realizado 10 dias após a subsolagem, enquanto que, no período seco, intervalos superiores há 30 dias são recomendados.

**G- Irrigação:** consiste em molhar, na época seca do ano, as mudas recém-plantadas buscando garantir a sobrevivência e o bom desenvolvimento da planta. As mangueiras utilizadas para a irrigação manual das mudas são acopladas a unidades móveis de irrigação (pipa). Estas unidades podem ser tracionadas por tratores de 85 ou 180 cv de potência, sendo os tratores de menor potência mais adequados à operacionalização desta atividade. A irrigação deve ser realizada até sete dias após o plantio.

**H- Adubação Manual com NPK:** consiste em aplicar nutrientes no solo ou na área de plantio com o objetivo de garantir o potencial de crescimento da floresta e a sustentabilidade produtiva do solo. Tratores de 85 cv acoplados a carretas acompanham as equipes durante a aplicação manual do adubo. O fertilizante é aplicado nas plantas com o auxílio de uma adubadeira manual. A aplicação do adubo deve ocorrer até sete dias após o plantio.

**P- Controle às Formigas – Manutenção:** apresenta as mesmas características da atividade A. Porém, esta atividade deve ser realizada nove semanas após o plantio. Devido ao período de revoada das formigas cortadeiras, somente os talhões plantados entre janeiro e maio precisam ser submetidos a esta atividade.

**Q- Capina Manual na Linha:** busca evitar perdas em produtividade da floresta causadas pela competição por água, luz e nutrientes com as plantas

daninhas. Esta atividade consiste em realizar a capina na linha de plantio utilizando ferramentas adequadas (enxadas). Devido ao maior crescimento das ervas daninhas na época chuvosa, a capina manual deve ser executada em intervalos menores nesse período do que na época seca. Na época seca o intervalo de tempo entre o plantio e a capina manual é de 105 dias enquanto que, para a época chuvosa, este intervalo diminui para 60 dias.

**R-** Aplicação de Herbicida Pós-Emergente na Linha com Costal: apresenta as mesmas características da atividade capina manual (Q). Porém, ao invés do controle físico, é realizado um controle químico através da utilização de um herbicida pós-emergente, aplicado sobre as plantas daninhas. Tratores de 85 cv acoplados a tanques de armazenamento, contendo o produto, são utilizados para abastecer os pulverizadores costais utilizados para a aplicação manual do produto. A aplicação de herbicida pós-emergente deve ocorrer entre 10 e 15 dias após a conclusão da capina manual.

A recomendação técnica expressa o intervalo de tempo necessário entre o início e o término de duas atividades dependentes.

Com o intuito de manter sigilo sobre as recomendações utilizadas pela empresa, os intervalos entre as atividades foram simulados. A partir dessa definição, os fluxogramas de processos apresentados nas figuras 9, 10 e 11 foram elaborados para as situações operacionais I, II e III.

O critério utilizado para definir a unidade temporal foi a semana (S), podendo conter, até 5 dias úteis, de acordo com o calendário operacional adotado.

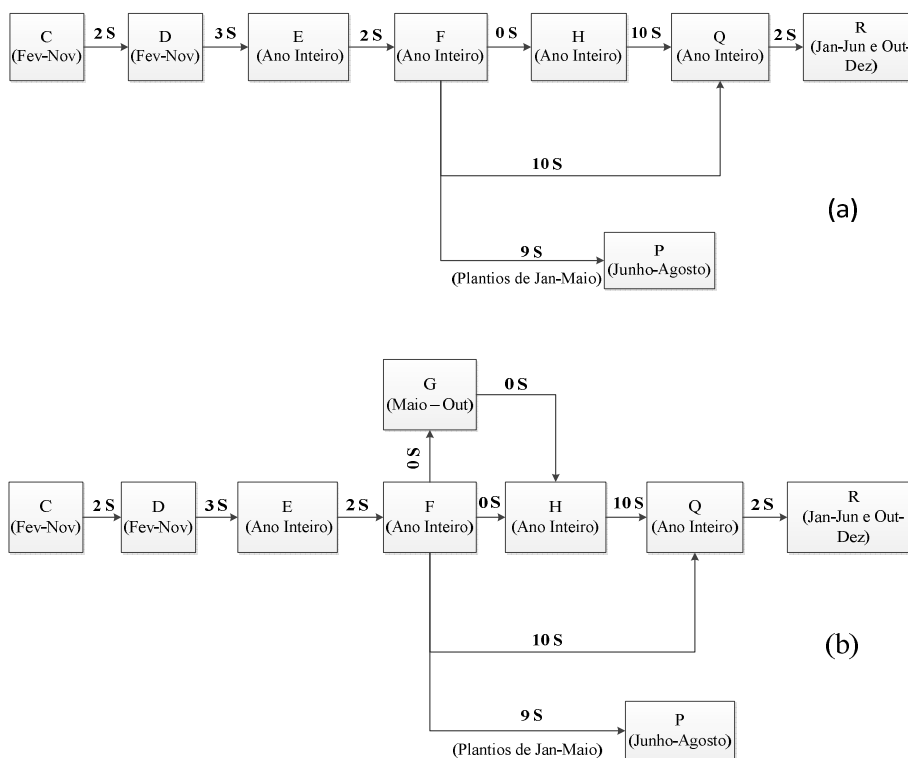


Figura 9 Fluxograma de recomendação técnica informando a dependência entre as atividades e os períodos permitidos de realização das mesmas, considerando a situação operacional I, sendo a) época chuvosa e b) época seca



Figura 10 Fluxograma de recomendação técnica informando a dependência entre as atividades e os períodos permitidos de realização das mesmas, considerando a situação operacional II

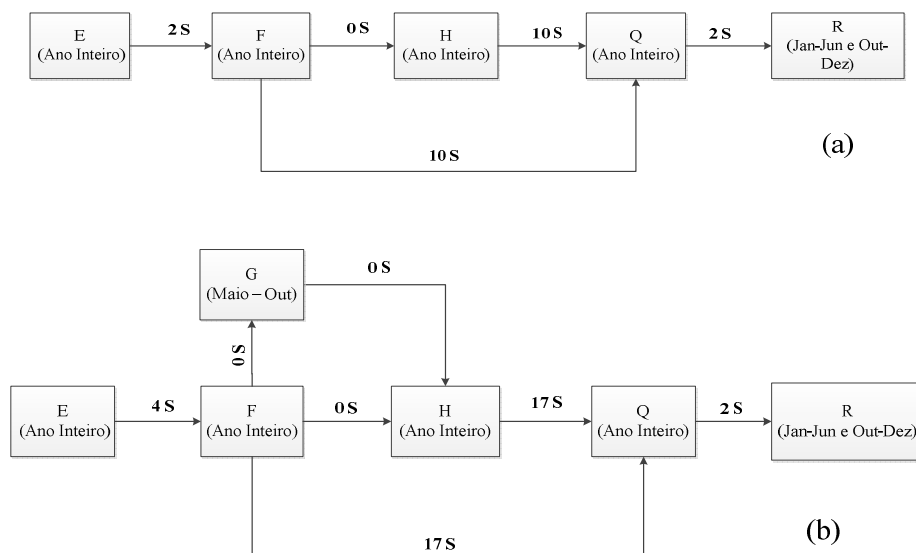


Figura 11 Fluxograma de recomendação técnica informando a dependência entre as atividades e os períodos permitidos de realização das mesmas, considerando a situação operacional III, sendo a) época chuvosa e b) época seca

#### 5.4 Geração do Plano Técnico de Atividades Silviculturais (PTAS)

A silvicultura com foco empresarial apresenta como característica um dinamismo de operações que ultrapassa, muitas vezes, a lógica climática de formação de um povoamento. O avanço tecnológico obtido ao longo dos anos tem permitido a execução contínua de atividades silviculturais, viabilizando a realização das atividades silviculturais durante todo ano.

Apesar desses avanços, quando são analisadas situações operacionais específicas, observou-se que os períodos possíveis de ocorrência das atividades não ocorrem durante todo o ano, devido às relações de dependência entre as atividades. De fato, os períodos viáveis de ocorrência das atividades de uma determinada situação operacional tornam-se bastante restritivos, uma vez que, o

objetivo do plano foi realizar todas as atividades recomendadas aos talhões no mesmo ano. Dessa forma, considerou-se que a última atividade recomendada precisou ser concluída até o final do ano sendo planejado.

Nesse sentido, o gestor silvicultural, precisa, obrigatoriamente, considerar somente as possibilidades viáveis de ocorrências das atividades para a realização do planejamento de atividades silviculturais. O Plano Técnico de Atividades Silviculturais (PTAS), apresenta, para cada situação operacional, as possibilidades viáveis de ocorrência das atividades.

Nesse trabalho, foi necessário apresentar o horizonte de tempo no qual o planejamento das atividades deve ocorrer. O horizonte considerado foi o anual, o qual foi dividido em 55 semanas, com início na segunda quinzena de dezembro do ano anterior e final na primeira quinzena de dezembro do ano corrente. As informações apresentadas na tabela 2 e nas figuras, 9, 10 e 11 são indispensáveis para a elaboração do PTAS. A figura 12 apresenta o PTAS para as três situações operacionais abordadas.



As semanas preenchidas em cinza representam períodos viáveis de ocorrência das atividades, respeitando as relações de dependência impostas e os intervalos recomendados entre as atividades. Ao analisar os talhões associados à situação operacional III, dois períodos viáveis de ocorrência são observados para a atividade de plantio. O primeiro ocorre entre as semanas 4 e 14 enquanto que o segundo ocorre entre as semanas 22 e 33. O plantio pode iniciar somente na semana 4 devido à necessidade de respeitar o intervalo de 2 dias, entre o término da atividade anterior (subsolagem) e o seu início. Por outro lado, no período chuvoso, a semana 14 representa o último momento viável de início do plantio para que todas as atividades subsequentes possam ser completadas até o final do ano.

A partir do início da época seca, o intervalo recomendado entre o plantio e a subsolagem muda para 4 dias. Portanto, nessa época, o plantio pode iniciar somente a partir da semana 22. Para que todas as atividades subsequentes possam ser concluídas no mesmo ano, o plantio pode iniciar, no mais tardar, na semana 33.

Conforme ilustram as figuras 9, 10 e 11, a atividade de irrigação ocorre somente durante o período seco, sendo desnecessária no período chuvoso. Por esta razão, observa-se a inexistência de períodos viáveis de ocorrência da atividade de irrigação durante a época chuvosa do ano.

A análise do PTAS permite também identificar que os intervalos de 10 e 17 semanas entre as atividades de plantio (F) e capina (Q), recomendados para as épocas chuvosa e seca respectivamente, também foram respeitados. Os números representados ao lado dos quadrados informam as contagens dos intervalos entre as atividades associadas à situação operacional III. Esses números atestam que os intervalos recomendados entre as atividades, apresentados no item 5.3, foram respeitados.



Os quadrados representados em branco para as atividades P e R, ilustram períodos inviáveis de ocorrência das atividades. Nesse caso, a inviabilidade de ocorrência das atividades está relacionada com a incompatibilidade em relação à época do ano permitida para a realização da atividade, mesmo que ocorra viabilidade em termos de relações de dependência entre as atividades. Por exemplo, o período recomendado para a ocorrência da atividade de aplicação de herbicida (R) ocorre durante os meses de alta umidade relativa, quando as ervas daninhas se desenvolvem com maior intensidade. O período viável de ocorrência dessa atividade resultante das relações de dependência, considerando a situação operacional I, ocorreu, conforme apresentado no PTAS, entre as semanas 32 e 43. Entretanto, esse intervalo representa um período com baixa umidade relativa do ar (época seca) tornando desnecessária a execução da atividade R nos talhões associados à situação operacional I.

### **5.5 Rendimentos, custos e lucratividade mínima esperada**

A realização das atividades depende da disponibilidade de mão-de-obra e máquinas, enquanto que a sua seleção/ativação compete aos custos e rendimentos do processo.

Dessa forma, para abastecer os coeficientes dos modelos matemáticos desenvolvidos, foi necessária a obtenção de dados operacionais e de custos relacionados às equipes responsáveis pela execução das onze atividades silviculturais. Complementarmente, foram simuladas equipes com formações diferentes em relação às sugeridas pela empresa. Para evitar a publicação de dados técnicos da empresa, os mesmos foram modificados. A Tabela 3 apresenta a quantidade de recursos alocados por equipe, seus rendimentos e os custos por atividade.

Tabela 3 Descrição da quantidade de recursos demandados por equipe, rendimentos por equipe e custos por atividade

| Atividade | Equip | Quantidade de recursos por equipe |                |              | Rendimento do recurso por equipe (horas/ha) |                        |                      | Custo (R\$/ha) |
|-----------|-------|-----------------------------------|----------------|--------------|---|------------------------|----------------------|----------------|
|           |       | Ajudante                          | Máquina Pesada | Máquina Leve | Ajudante (HH/ha)                            | Máquina Pesada (HM/ha) | Máquina Leve (HM/ha) |                |
| A         | 1     | 13                                | -              | -            | 0,4231                                      | -                      | -                    | 2.002,00       |
|           | 2     | 18                                | -              | -            | 0,3056                                      | -                      | -                    | 2.772,00       |
| B         | 1     | 13                                | -              | -            | 0,2115                                      | -                      | -                    | 1.001,00       |
|           | 2     | 18                                | -              | -            | 0,1528                                      | -                      | -                    | 1.386,00       |
| C         | 1     | 13                                | -              | -            | 0,4231                                      | -                      | -                    | 2.002,00       |
|           | 2     | 18                                | -              | -            | 0,3056                                      | -                      | -                    | 2.772,00       |
| D         | 1     | 13                                | -              | -            | 0,2115                                      | -                      | -                    | 1.001,00       |
|           | 2     | 18                                | -              | -            | 0,1528                                      | -                      | -                    | 1.386,00       |
| E         | 1     | 3                                 | 3              | -            | 0,6600                                      | 0,4400                 | -                    | 871,20         |
|           | 2     | 4                                 | 5              | -            | 0,4950                                      | 0,3300                 | -                    | 1.396,56       |
| F         | 1     | 11                                | -              | -            | 0,7000                                      | -                      | -                    | 2.371,60       |
|           | 2     | 14                                | -              | -            | 0,5500                                      | -                      | -                    | 3.018,40       |
| G         | 1     | 6                                 | -              | 2            | 0,7333                                      | -                      | 0,1375               | 919,05         |
| H         | 1     | 19                                | -              | 1            | 0,2316                                      | -                      | 0,0145               | 2.370,77       |
| P         | 1     | 13                                | -              | -            | 0,1231                                      | -                      | -                    | 582,40         |
|           | 2     | 18                                | -              | -            | 0,0889                                      | -                      | -                    | 806,40         |
| R         | 1     | 15                                | -              | -            | 0,4667                                      | -                      | -                    | 2.940,00       |
| Q         | 1     | 15                                | -              | 1            | 0,5133                                      | -                      | 0,0308               | 3.284,35       |

Em que: HH/ha: rendimento da equipe, em horas homem, do recurso ajudante; HM/ha: rendimento da equipe, em horas máquina, dos recursos máquina pesada e máquina leve; R\$/ha: custo da atividade, em reais por hectare.

Os recursos máquina e mão-de-obra foram considerados renováveis, já que, semanalmente, voltam a estar 100% disponíveis para o trabalho. Assim, a quantidade de recursos (Q) ao longo das semanas foi considerada constante. Entretanto, a quantidade diária de horas trabalhadas por recurso (H) seguiu comportamentos distintos. Para o recurso mão-de-obra considerou-se um período de 8 horas/dia, enquanto que para as máquinas 5 horas/dia. Estes critérios foram fornecidos pela empresa e, portanto, refletem informações reais. A tabela 4 apresenta uma síntese dos valores disponíveis dos recursos por atividade.

Tabela 4 Descrição das horas efetivas de trabalho por recurso e atividade e sua quantidade máxima ofertada semanalmente

| J | Descrição do Recurso | Atividades que usam este recurso | Quantidade de recursos (Q) | Horas trabalhadas ao dia (H) |
|---|----------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | Ajudante Florestal   | Todas                            | 183                        | 8                            |
| 2 | Máquina Pesada       | E                                | 7                          | 5                            |
| 3 | Máquina Leve         | G, H, R                          | 15                         | 5                            |
| 4 | Operador Máq. Pesada | E                                | 12                         | 5                            |
| 5 | Operador Máq. Leve   | G, H, R                          | 20                         | 5                            |

Em que: Q: quantidade de recursos da empresa disponível ao longo das semanas; H: quantidade diária de horas trabalhadas por recurso.

Devido à utilização de um calendário operacional, o número de dias úteis por semana (N) variou ao longo do projeto. A partir das informações apresentadas na tabela 4 e do número de dias úteis existentes por semana (N), foi calculada a disponibilidade em horas disponível semanalmente de cada recurso ( $DH_{ij}$ ), conforme apresentado na equação 1.

$$DH_{ij} = Q_i N_i H_j \quad (1)$$

Em que:

$DH_{ij}$ = disponibilidade, em horas, disponível na semana  $i$  do recurso  $j$ ;

$i$ = número de semanas,  $i=\{1,2,3,\dots,55\}$ ;

$j$ = número de recursos,  $j=\{1,2,3\}$ ;

$Q_i$ = quantidade total de recursos ofertada por recurso  $j$ ;

$N_i$ = número de dias úteis por semana  $i$ , considerando o calendário operacional adotado;

$H_j$ = quantidade de horas/dia efetivamente trabalhadas por recurso  $j$ .

Em virtude da natureza da empresa ser a prestação de serviços silviculturais, foi necessário simular o valor da receita líquida esperada, por atividade, resultante da realização da empreitada silvicultural. Dessa forma, foi possível representar nos modelos restrições de lucratividade mínima esperada sobre a prestação do serviço silvicultural.

Inicialmente, estipulou-se uma margem arbitrária de lucratividade mínima por atividade, para que o preço a ser cobrado por atividade pudesse ser calculado. Uma rentabilidade de 5% foi aplicada sobre os custos operacionais, permitindo o cálculo dos preços. Finalmente, a receita líquida por atividade, antes da tributação, foi obtida através da subtração do preço pelo custo das atividades. O fluxograma da figura 14 apresenta o processo de cálculo do valor da receita líquida esperada por atividade.

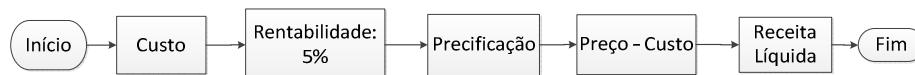


Figura 13 Fluxograma apresentando a forma de cálculo da receita líquida esperada por atividade

## 5.6 Formulação matemática

O problema florestal foi caracterizado com a necessidade de minimizar o valor do custo operacional total, resultante da utilização de diferentes formações de equipes por atividade silvicultural, ao longo de um ano. A resposta principal almejada, do ponto de vista operacional, foi identificar as áreas a serem realizadas semanalmente por atividade silvicultural. Assim, para auxiliar o processo de tomada de decisão, foram desenvolvidos dois modelos de programação linear, sendo: 1) PL: modelo contendo variáveis de decisão de natureza contínua; 2) PLI: modelo contendo variáveis de decisão de natureza binária  $\{0,1\}$ .

### 5.6.1 Programação Linear (PL)

A variável de decisão desse modelo foi definida como sendo a área, em hectares, a ser realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  considerando o período  $t$ , discriminada por atividade silvicultural.

Posteriormente, a função objetivo (2) do problema foi definida como a soma algébrica do produto dos custos (R\$/ha) pela quantidade, em área (ha), selecionada para a execução das onze atividades silviculturais recomendadas aos 36 talhões, de acordo com a situação operacional de cada um deles.

FO: Minimizar Custo (R\$):

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{La} \sum_{k=1}^{Ma} \sum_{t=1}^{Na} Ca_{jkt} Xa_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} \sum_{t=1}^{Nb} Cb_{jkt} Xb_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lc} \sum_{k=1}^{Mc} \sum_{t=1}^{Nc} Cc_{jkt} Xc_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} \sum_{t=1}^{Nd} Cd_{jkt} Xd_{jkt} + \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} \sum_{t=1}^{Ne} Ce_{jkt} Xe_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} \sum_{t=1}^{Nf} Cf_{jkt} Xf_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} \sum_{t=1}^{Ng} Cg_{jkt} Xg_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} \sum_{t=1}^{Nh} Ch_{jkt} Xh_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lp} \sum_{k=1}^{Mp} \sum_{t=1}^{Np} Cp_{jkt} Xp_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} \sum_{t=1}^{Nq} Cq_{jkt} Xq_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} \sum_{t=1}^{Nr} Cr_{jkt} Xr_{jkt} \tag{2}
\end{aligned}$$

Em que:

$La$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $a$ ;

$Ma$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $a$ ;

$Na$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $a$ ;

$Xa_{jkt}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $a$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$Ca_{jkt}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $a$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$Lb$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $b$ ;

$Mb$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $b$ ;

$Nb$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $b$ ;

$Xb_{jkt}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $b$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$Cb_{jkt}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $b$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$Lc$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $c$ ;

$M_c$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $c$ ;

$N_c$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $c$ ;

$X_{c_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $c$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{c_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $c$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$L_d$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $d$ ;

$M_d$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $d$ ;

$N_d$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $d$ ;

$X_{d_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $d$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{d_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $d$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$L_e$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $e$ ;

$M_e$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $e$ ;

$N_e$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $e$ ;

$X_{e_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $a$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{e_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $e$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$L_f$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $f$ ;

$M_f$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $f$ ;

$N_f$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $f$ ;

$X_{f_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $f$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{f_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $f$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$L_g$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $g$ ;

$M_g$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $g$ ;

$N_g$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $g$ ;

$X_{g_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $g$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{g_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $g$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$L_h$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $h$ ;

$M_h$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $h$ ;

$N_h$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $h$ ;

$X_{h_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $h$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{h_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $h$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$L_p$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $p$ ;

$M_p$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $p$ ;

$N_p$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $p$ ;

$X_{p_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $p$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{p_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $p$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;



$L_q$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $q$ ;

$M_q$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $q$ ;

$N_q$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $q$ ;

$X_{q_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $q$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{q_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $q$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$L_r$  - número total de equipes formadas considerando a atividade  $r$ ;

$M_r$  - número total de talhões a serem trabalhados considerando a atividade  $r$ ;

$N_r$  - número total de períodos viáveis de ocorrência da atividade  $r$ ;

$X_{r_{jkt}}$  - variável de decisão contínua identificando a área, em hectares, a ser realizada da atividade  $r$  pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{r_{jkt}}$  - valor do custo, em reais por hectare, da atividade  $r$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

As restrições relacionadas ao negócio silvicultural, para o problema abordado, são representadas pelo limite máximo em área por talhão, pela relação de dependência entre as atividades, disponibilidade de recursos, necessidade de cumprimento de metas de produção e lucratividade do projeto.

Assim as restrições de (3) a (13) garantem que, independentemente da equipe e do período de execução, a área total a ser trabalhada em cada talhão nunca seja ultrapassada.

$$\sum_{j=1}^{La} \sum_{t=1}^{Na} Xa_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{Lb} \sum_{t=1}^{Nb} Xb_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{Lc} \sum_{t=1}^{Nc} Xc_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{Ld} \sum_{t=1}^{Nd} Xd_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{Le} \sum_{t=1}^{Ne} Xe_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{Lf} \sum_{t=1}^{Nf} Xf_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{Lg} \sum_{t=1}^{Ng} Xg_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{Lh} \sum_{t=1}^{Nh} Xh_{ijk} \leq A_k, \forall_k \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{Lp} \sum_{t=1}^{Np} Xp_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^{Lq} \sum_{t=1}^{Nq} Xq_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^{Lr} \sum_{t=1}^{Nr} Xr_{jkt} \leq A_k, \forall_k \quad (13)$$

Em que:

$A_k$ – área, em hectares, do talhão  $k$ .

As relações de dependência entre duas atividades são representadas pelas restrições de (14) a (26). Estas restrições precisam ser discriminadas por situação operacional (I, II, III), uma vez que, o conjunto de atividades

recomendadas aos talhões depende do histórico operacional dos mesmos. Por exemplo, para a situação operacional II, somente as atividades A e B foram recomendadas. Portanto, para os talhões 27 a 34, faz-se necessário considerar somente os períodos de ocorrência dessas duas atividades. Assim, para cada área (ha) executada pela atividade A no período  $t$  de ocorrência, o mesmo valor em área (ha) será realizado pela atividade B no período  $t+s$  para o talhão  $k$  avaliado, onde  $s$  indica o período técnico de tempo recomendado entre as duas atividades. O intervalo  $s$  recomendado entre as atividades dependentes pode ser identificado, para cada situação operacional, nos fluxogramas apresentados nas figuras 9, 10 e 11.

As restrições de (14) a (20) estão associadas à situação operacional I, enquanto as restrições (21) e (22) a (26) estão relacionadas às situações operacionais II, e III, respectivamente.

$$\sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} Xd_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lc} \sum_{k=1}^{Mc} Xc_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in cd \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} Xe_{jkt} - \sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} Xd_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in de \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jkt} - \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} Xe_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in ef \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} Xg_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fg \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} Xh_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fh \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{Lp} \sum_{k=1}^{Mp} Xp_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fp \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} Xq_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fq \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} Xb_{jkt} - \sum_{j=1}^{La} \sum_{k=1}^{Ma} Xa_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in ab \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jkt} - \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} Xe_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in ef \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} Xg_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fg \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} Xh_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fh \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} Xq_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fq \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} Xr_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fr \quad (26)$$

As restrições (27), (28) e (29) abordam as limitações impostas pela disponibilidade dos recursos necessários para a realização das atividades

silviculturais. Na restrição (27) é abordada a disponibilidade dos recursos Máquina Pesada e seu Operador. O recurso máquina foi considerado como fator limitante à operação já que é comum a disponibilidade de mais de um operador para cada máquina. Dessa forma, foi suficiente representar somente a disponibilidade do equipamento. Esta restrição garante que a quantidade de horas máquina alocada semanalmente do recurso máquina pesada, não seja superior, à quantidade de horas máquina disponível semanalmente deste recurso. A mesma lógica foi aplicada para as restrições (28) e (29), que tratam, respectivamente, dos recursos Máquina Leve e seu Operador e Ajudante Florestal.

$$\sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} R_{MaqPes} e_{jkt} X_{ejkt} \leq DH_{MaqPes}, \forall t \in MaqPes \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} R_{MaqLeve} g_{jkt} X_{gjkt} + \sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} R_{MaqLeve} h_{jkt} X_{hjkt} + \\ & + \sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} R_{MaqLeve} r_{jkt} X_{rjkt} \leq DH_{MaqLeve}, \forall t \in MaqLeve \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{La} \sum_{k=1}^{Ma} R_{Aj} a_{jkt} X_{ajkt} + \sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} R_{Aj} b_{jkt} X_{bjkt} + \sum_{j=1}^{Lc} \sum_{k=1}^{Mc} R_{Aj} c_{jkt} X_{cjkt} + \\ & + \sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} R_{Aj} d_{jkt} X_{djkt} + \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} R_{Aj} e_{jkt} X_{ejkt} + \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} R_{Aj} f_{jkt} X_{fjkt} + \\ & + \sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} R_{Aj} g_{jkt} X_{gjkt} + \sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} R_{Aj} h_{jkt} X_{hjkt} + \sum_{j=1}^{Lp} \sum_{k=1}^{Mp} R_{Aj} p_{jkt} X_{pjkt} + \\ & + \sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} R_{Aj} q_{jkt} X_{qjkt} + \sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} R_{Aj} r_{jkt} X_{rjkt} \leq DH_{Aj} \quad \forall t \in Aj \quad (29) \end{aligned}$$

Em que:

$R_{\text{MaqPes}e_{jkt}}$  rendimento do recurso máquina pesada, em horas máquina/hectare, quando a atividade  $e$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{MaqLeve}g_{jkt}}$  rendimento do recurso máquina leve, em horas máquina/hectare, quando a atividade  $g$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{MaqLeve}h_{jkt}}$  rendimento do recurso máquina leve, em horas máquina/hectare, quando a atividade  $h$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{MaqLeve}r_{jkt}}$  rendimento do recurso máquina leve, em horas máquina/hectare, quando a atividade  $r$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{Aj}a_{jkt}}$  rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $a$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{Aj}b_{jkt}}$  rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $b$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{Aj}c_{jkt}}$  rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $c$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{Aj}d_{jkt}}$  rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $d$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{Aj}e_{jkt}}$  rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $e$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{Aj}f_{jkt}}$  rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $f$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{Aj}g_{jkt}}$  rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $g$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{\text{Aj}h_{jkt}}$  rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $h$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Aj}p_{jkt}$  - rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $p$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Aj}q_{jkt}$  - rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $q$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Aj}r_{jkt}$  - rendimento do recurso ajudante, em horas homem/hectare quando a atividade  $r$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$DH_{MaqPes}$  - disponibilidade semanal, em horas máquina, do recurso máquina pesada;

$DH_{MaqLeve}$  - disponibilidade semanal, em horas máquina, do recurso máquina leve;

$DH_{Aj}$  - disponibilidade semanal, em horas homem, do recurso ajudante.

Os coeficientes do LHS (*LeftHandSide*) da restrição (27) expressam o rendimento do recurso Máquina Pesada, em horas máquina/ha, considerando a atividade  $e$  quando realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  e período  $t$  ( $R_{MaqPes}e_{jkt}$ ). Dentre as onze atividades consideradas, somente a atividade de subsolagem (E) faz uso do recurso máquina pesada. Por isso, a restrição (27) apresenta somente um componente de LHS. As restrições (28) e (29) tratam de recursos associados a mais de uma atividade. Nestes casos, todas as atividades que fazem uso destes recursos formaram o LHS destas restrições. O LHS da restrição (29) possui todas as onze atividades já que todas elas fazem uso do recurso ajudante florestal (mão-de-obra).

Caso metas de produção não sejam impostas aos modelos, nem mesmo um único hectare será realizado nos talhões estudados. Isto se deve a natureza da função objetivo (Minimizar). Realizar zero hectare é a melhor solução possível a ser encontrada uma vez que, neste caso, os custos serão os menores possíveis (custo zero). Para controlar esse feito, as restrições (30) e (31) envolvendo metas de produção em área foram adicionadas ao modelo. Em nível de gestão de

projetos silviculturais, normalmente, as metas são definidas para a atividade de plantio. A partir da quantidade estipulada para o plantio, são definidas as quantidades a serem realizadas das demais atividades. Logo, devido ao atendimento das relações de dependência, as demais atividades seguem esta meta, indiretamente.

Dessa forma, a restrição (30) apresenta as metas semanais de plantio estabelecidas para as situações operacionais I e III. Devido a inexistência da atividade de plantio, associada à situação operacional II, a meta de produção foi atribuída a atividade B (2º Combate às Formigas-Antecipação), representada pela restrição (31).

$$\sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} Xf_{jkt} \geq Metaf_t, \forall t \in f \quad (30)$$

$$\sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} Xb_{jkt} \geq Metab_t, \forall t \in b \quad (31)$$

Em que:

Meta  $f_t$ : Meta, em hectares, da atividade  $f$  no período  $t$ ;

Meta  $b_t$ : Meta, em hectares, da atividade  $b$  no período  $t$ ;

Ao considerar o cenário de prestação de serviços silviculturais, torna-se estratégico conhecer a lucratividade prevista do projeto. Devido à complexidade do negócio e o dinamismo do processo, representado pela variação dos custos de produção, é comum que o prestador de serviços silviculturais identifique, ao final do trabalho, que a lucratividade do projeto foi muito aquém da prevista.

Para que as margens de lucratividade desejadas sejam atingidas ao término do trabalho, é imprescindível determinar corretamente os preços a serem cobrados por cada atividade. Nesse sentido, representar os preços a serem



cobrados durante a elaboração do planejamento das atividades é crucial para o sucesso financeiro da prestação de serviços silviculturais. A restrição (32) garante que o somatório das receitas líquidas obtidas, a partir da execução das atividades silviculturais, não seja inferior a uma lucratividade mínima (LM) previamente estabelecida para o projeto.

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{La} \sum_{k=1}^{Ma} \sum_{t=1}^{Na} RL_{jkt} Xa_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} \sum_{t=1}^{Nb} RL_{jkt} Xb_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lc} \sum_{k=1}^{Mc} \sum_{t=1}^{Nc} RLC_{jkt} Xc_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} \sum_{t=1}^{Nd} RLD_{jkt} Xd_{jkt} + \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} \sum_{t=1}^{Ne} RLe_{jkt} Xe_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} \sum_{t=1}^{Nf} RLf_{jkt} Xf_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} \sum_{t=1}^{Ng} RLg_{jkt} Xg_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} \sum_{t=1}^{Nh} RLh_{jkt} Xh_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lp} \sum_{k=1}^{Mp} \sum_{t=1}^{Np} Rlp_{jkt} Xp_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} \sum_{t=1}^{Nq} RLq_{jkt} Xq_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} \sum_{t=1}^{Nr} RLr_{jkt} Xr_{jkt} \geq LM
\end{aligned} \tag{32}$$

Em que:

$RLa_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $a$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLb_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $b$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLc_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $c$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLd_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $d$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLe_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $e$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLf_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $f$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLg_{jkt}$ – receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $g$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLh_{jkt}$ – receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $h$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLp_{jkt}$ – receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $p$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLq_{jkt}$ – receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $q$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$RLr_{jkt}$ – receita líquida esperada, em reais por hectare, sobre a atividade  $r$  realizada pela equipe  $j$  no talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$LM$  – lucratividade mínima, em reais, a ser atingida sobre o projeto florestal.

Por fim, restrições de não negatividade (33) foram introduzidas para que as características do problema formulado fossem atendidas, respeitando as propriedades da programação linear.

$$X_{jkt} \geq 0 \quad (33)$$

### 5.6.2 Programação Linear Inteira (PLI)

A variável de decisão deste modelo está associada à ativação ou não de talhões que devem ser submetidos às atividades silviculturais abordadas neste estudo. Quando ativada  $\{1\}$ , a variável de decisão  $X_{ajkt}$  informa que o talhão  $k$  foi selecionado para ser submetido à atividade  $a$  através da utilização da equipe  $j$  considerando o período  $t$  de tempo. Assim, a função objetivo (34) do problema pode ser definida como a soma algébrica dos custos (R\$), resultantes da seleção de talhões a serem submetidos às onze atividades silviculturais.

Minimizar Custo (R\$):

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{La} \sum_{k=1}^{Ma} \sum_{t=1}^{Na} Ca_{jkt} Xa_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} \sum_{t=1}^{Nb} Cb_{jkt} Xb_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lc} \sum_{k=1}^{Mc} \sum_{t=1}^{Nc} Cc_{jkt} Xc_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} \sum_{t=1}^{Nd} Cd_{jkt} Xd_{jkt} + \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} \sum_{t=1}^{Ne} Ce_{jkt} Xe_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} \sum_{t=1}^{Nf} Cf_{jkt} Xf_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} \sum_{t=1}^{Ng} Cg_{jkt} Xg_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} \sum_{t=1}^{Nh} Ch_{jkt} Xh_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lp} \sum_{k=1}^{Mp} \sum_{t=1}^{Np} Cp_{jkt} Xp_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} \sum_{t=1}^{Nq} Cq_{jkt} Xq_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} \sum_{t=1}^{Nr} Cr_{jkt} Xr_{jkt}
\end{aligned} \tag{34}$$

Em que:

$Xa_{jkt}$ — variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $a$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$Xb_{jkt}$ — variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $b$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$Xc_{jkt}$ — variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $c$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$Xd_{jkt}$ — variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $d$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$Xe_{jkt}$ — variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $e$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$X_{f_{jkt}}$  – variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $f$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$X_{g_{jkt}}$  – variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $g$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$X_{h_{jkt}}$  – variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $h$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$X_{p_{jkt}}$  – variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $p$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$X_{q_{jkt}}$  – variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $q$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$X_{r_{jkt}}$  – variável de decisão binária (0/1) identificando a ativação ou desativação do talhão  $k$  a ser submetido à atividade  $r$  através da utilização da equipe  $j$  durante o período  $t$ ;

$Ca_{jkt}$  – valor do custo, em reais, da atividade  $a$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$Cb_{jkt}$  – valor do custo, em reais, da atividade  $b$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$Cc_{jkt}$  – valor do custo, em reais, da atividade  $c$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$Cd_{jkt}$  – valor do custo, em reais, da atividade  $d$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$Ce_{jkt}$  – valor do custo, em reais, da atividade  $e$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{f_{jkt}}$ – valor do custo, em reais, da atividade  $f$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{g_{jkt}}$ – valor do custo, em reais, da atividade  $g$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{h_{jkt}}$ – valor do custo, em reais, da atividade  $h$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{p_{jkt}}$ – valor do custo, em reais, da atividade  $p$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{q_{jkt}}$ – valor do custo, em reais, da atividade  $q$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

$C_{r_{jkt}}$ – valor do custo, em reais, da atividade  $r$  quando realizada pela equipe  $j$  em todo talhão  $k$  durante o período  $t$ ;

As restrições de (35) a (45) conferem integridade em área ao modelo. Devido à natureza booleana da variável de decisão, estas restrições garantem que os talhões nunca sejam trabalhados de forma parcial. Se selecionado, 100% da área do talhão sempre é realizada por somente uma equipe. Caso metas de produção não sejam impostas, nenhum talhão será selecionado, permitindo, portanto, o abandono de áreas.

$$\sum_{j=1}^{La} \sum_{t=1}^{Na} Xa_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^{Lb} \sum_{t=1}^{Nb} Xb_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (36)$$

$$\sum_{j=1}^{Lc} \sum_{t=1}^{Nc} Xc_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (37)$$

$$\sum_{j=1}^{Ld} \sum_{t=1}^{Nd} Xd_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (38)$$

$$\sum_{j=1}^{Le} \sum_{t=1}^{Ne} Xe_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (39)$$

$$\sum_{j=1}^{Lf} \sum_{t=1}^{Nf} Xf_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (40)$$

$$\sum_{j=1}^{Lg} \sum_{t=1}^{Ng} Xg_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (41)$$

$$\sum_{j=1}^{Lh} \sum_{t=1}^{Nh} Xh_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (42)$$

$$\sum_{j=1}^{Lp} \sum_{t=1}^{Np} Xp_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (43)$$

$$\sum_{j=1}^{Lq} \sum_{t=1}^{Nq} Xq_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (44)$$

$$\sum_{j=1}^{Lr} \sum_{t=1}^{Nr} Xr_{jkt} \leq 1, \forall_k \quad (45)$$

Matematicamente, a única diferença dessas restrições com as restrições (3) a (13) está associada ao RHS. Enquanto que o RHS da restrição de área do modelo de PL informa a área do talhão  $k$  a ser submetida à determinada atividade, o RHS da restrição de integridade representa a forma ativada da variável de decisão do modelo de PLI, ou seja, 1.

As restrições do modelo de PLI que representam as relações de dependência, entre as atividades são rigorosamente as mesmas aplicadas ao modelo de PL. As equações (14) a (26) são idênticas às equações (46) a (58), sendo as restrições (46) a (52) relacionadas à situação operacional I e as restrições (53) e (54) a (58) associadas às situações II e III, respectivamente.

$$\sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} Xd_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lc} \sum_{k=1}^{Mc} Xc_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in cd \quad (46)$$

$$\sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} Xe_{jkt} - \sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} Xd_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in de \quad (47)$$

$$\sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jkt} - \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} Xe_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in ef \quad (48)$$

$$\sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} Xg_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fg \quad (49)$$

$$\sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} Xh_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fh \quad (50)$$

$$\sum_{j=1}^{Lp} \sum_{k=1}^{Mp} Xp_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fp \quad (51)$$

$$\sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} Xq_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fq \quad (52)$$

$$\sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} Xb_{jkt} - \sum_{j=1}^{La} \sum_{k=1}^{Ma} Xa_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in ab \quad (53)$$

$$\sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jkt} - \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} Xe_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in ef \quad (54)$$

$$\sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} Xg_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fg \quad (55)$$

$$\sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} Xh_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fh \quad (56)$$

$$\sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} Xq_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fq \quad (57)$$

$$\sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} Xr_{jkt} - \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} Xf_{jk(t+s)} = 0, \quad \forall t \in fr \quad (58)$$

Entretanto, a interpretação dessas restrições considerando os dois modelos propostos é suavemente diferente. Enquanto que a verificação matemática da restrição de dependência é feita através da comparação (subtração) das áreas selecionadas para duas atividades dependentes no modelo de PL, esta verificação é feita, no caso do modelo de PLI, através da comparação dos talhões ativados para serem submetidos às duas atividades dependentes.

As restrições de limitação de disponibilidade dos recursos (máquina e mão-de-obra) são representadas pelas equações (59), (60) e (61), associadas, respectivamente, aos recursos, máquina pesada, máquina leve e ajudante. Essas restrições garantem que a quantidade semanal de horas alocadas, de cada recurso, não seja superior à quantidade de horas semanais disponíveis do mesmo. As referidas restrições são idênticas às equações (27), (28) e (29) em sua lógica, diferindo apenas no valor dos coeficientes associados às variáveis de decisão. Nesse caso, os rendimentos (h/ha) de cada atividade utilizados no modelo de PL foram multiplicados pela total de cada talhão, resultando em rendimentos em horas no modelo de PLI.

$$\sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} R_{MaqPes} e_{jkt} Xe_{jkt} \leq DH_{MaqPes}, \quad \forall t \in MaqPes \quad (59)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} R_{MaqLeve} g_{jkt} Xg_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} R_{MaqLeve} h_{jkt} Xh_{jkt} + \\ & + \sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} R_{MaqLeve} r_{jkt} Xr_{jkt} \leq DH_{MaqLeve}, \quad \forall t \in MaqLeve \end{aligned} \quad (60)$$



$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{La} \sum_{k=1}^{Ma} R_{Aj} a_{jkt} X_{a_{jkt}} + \sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} R_{Aj} b_{jkt} X_{b_{jkt}} + \sum_{j=1}^{Lc} \sum_{k=1}^{Mc} R_{Aj} c_{jkt} X_{c_{jkt}} + \\
& + \sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} R_{Aj} d_{jkt} X_{d_{jkt}} + \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} R_{Aj} e_{jkt} X_{e_{jkt}} + \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} R_{Aj} f_{jkt} X_{f_{jkt}} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} R_{Aj} g_{jkt} X_{g_{jkt}} + \sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} R_{Aj} h_{jkt} X_{h_{jkt}} + \sum_{j=1}^{Lp} \sum_{k=1}^{Mp} R_{Aj} p_{jkt} X_{p_{jkt}} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} R_{Aj} q_{jkt} X_{q_{jkt}} + \sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} R_{Aj} r_{jkt} X_{r_{jkt}} \leq DH_{Aj}, \forall t \in A_j \quad (61)
\end{aligned}$$

Em que:

$R_{MaqPes} e_{jkt}$ – rendimento do recurso máquina pesada, em horas máquina, quando a atividade  $e$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{MaqLeve} g_{jkt}$ – rendimento do recurso máquina leve, em horas máquina, quando a atividade  $g$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{MaqLeve} h_{jkt}$ – rendimento do recurso máquina leve, em horas máquina, quando a atividade  $h$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{MaqLeve} r_{jkt}$ – rendimento do recurso máquina leve, em horas máquina, quando a atividade  $r$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Aj} a_{jkt}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $a$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Aj} b_{jkt}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $b$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Aj} c_{jkt}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $c$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Aj} d_{jkt}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $d$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Aj} e_{jkt}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $e$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Ajf_{jkt}}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $f$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Ajg_{jkt}}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $g$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Ajh_{jkt}}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $h$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Ajp_{jkt}}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $p$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Ajq_{jkt}}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $q$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

$R_{Ajr_{jkt}}$ – rendimento do recurso ajudante, em horas homem, quando a atividade  $r$  é executada pela equipe  $j$ , no talhão  $k$ , durante o período  $t$ ;

Uma transformação similar à realizada anteriormente foi aplicada para elaborar as restrições de metas (62) e (63) a partir das restrições (30) e (31). A área de cada talhão (ha) foi incorporada como coeficiente do LHS da restrição de meta do modelo PLI. A equação (62) foi aplicada aos talhões associados à situação operacional I e III, enquanto que a equação (63) foi aplicada aos talhões associados à situação operacional II.

$$\sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} A_k X_{f_{jkt}} \geq Meta_f, \forall t \in f \quad (62)$$

$$\sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} A_k X_{b_{jkt}} \geq Meta_b, \forall t \in b \quad (63)$$

A imposição de limites mínimos de lucratividade do projeto (64) exerce o mesmo papel desempenhado pela equação (34), sendo que a receita líquida

esperada está associada ao talhão. Esse coeficiente é expresso, portanto, em reais e não em reais/hectare conforme aplicado para o modelo de PL.

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{La} \sum_{k=1}^{Ma} \sum_{t=1}^{Na} RL_{jkt} Xa_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lb} \sum_{k=1}^{Mb} \sum_{t=1}^{Nb} RL_{jkt} Xb_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lc} \sum_{k=1}^{Mc} \sum_{t=1}^{Nc} RLC_{jkt} Xc_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Ld} \sum_{k=1}^{Md} \sum_{t=1}^{Nd} RLD_{jkt} Xd_{jkt} + \sum_{j=1}^{Le} \sum_{k=1}^{Me} \sum_{t=1}^{Ne} RLe_{jkt} Xe_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lf} \sum_{k=1}^{Mf} \sum_{t=1}^{Nf} RLf_{jkt} Xf_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lg} \sum_{k=1}^{Mg} \sum_{t=1}^{Ng} RLg_{jkt} Xg_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lh} \sum_{k=1}^{Mh} \sum_{t=1}^{Nh} RLh_{jkt} Xh_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lp} \sum_{k=1}^{Mp} \sum_{t=1}^{Np} Rlp_{jkt} Xp_{jkt} + \\
& + \sum_{j=1}^{Lq} \sum_{k=1}^{Mq} \sum_{t=1}^{Nq} RLq_{jkt} Xq_{jkt} + \sum_{j=1}^{Lr} \sum_{k=1}^{Mr} \sum_{t=1}^{Nr} RLr_{jkt} Xr_{jkt} \geq LM
\end{aligned} \tag{64}$$

Em que:

$RLa_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $a$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RLb_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $b$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RLc_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $c$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RLd_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $d$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RLe_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $e$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RLf_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $f$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RLg_{jkt}$ — receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $g$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RL_{h_{jkt}}$ – receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $h$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RL_{p_{jkt}}$ – receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $p$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RL_{q_{jkt}}$ – receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $q$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

$RL_{r_{jkt}}$ – receita líquida esperada, em reais, resultante da realização da atividade  $r$  realizada pela equipe  $j$  em todo o talhão  $k$  no o período  $t$ ;

Por fim, restrições de não negatividade e binária (65) foram introduzidas para que as características do problema formulado fossem atendidas.

$$X_{jkt} = \{0,1\} \quad (65)$$

### 5.7 Cenários propostos

A geração de cenários é uma forma de validar a eficácia dos modelos desenvolvidos, o que inclui simular diferentes situações de aplicabilidade. Sendo assim, foram testados 10 cenários, considerando arranjos diversos entre as restrições descritas anteriormente. Esses arranjos são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 Cenários testes de validação da eficácia dos modelos propostos

| Cenário | Modelo | Restrições Impostas   | Equações    |
|---------|--------|---|-------------|
| 1       | PL     | Área  | 2 a 13; 33  |
| 2       | PL     | Área + Dependência  | 2 a 26; 33  |
| 3       | PL     | Área + Dependência + Disp. de Recursos  | 2 a 29; 33  |
| 4       | PL     | Área + Dependência + Disp. de Recursos + Metas                                  | 2 a 31; 33  |
| 5       | PL     | Área + Dependência + Disp. de Recursos + Metas +<br>Lucratividade Mínima        | 2 a 32; 33  |
| 6       | PLI    | Integridade   | 34 a 45; 65 |
| 7       | PLI    | Integridade + Dependência   | 34 a 58; 65 |
| 8       | PLI    | Integridade + Dependência + Disp. de Recursos                                   | 34 a 61; 65 |
| 9       | PLI    | Integridade + Dependência + Disp. de Recursos +<br>Metas                        | 34 a 63; 65 |
| 10      | PLI    | Integridade + Dependência + Disp. de Recursos +<br>Metas + Lucratividade Mínima | 34 a 64; 65 |

Os cenários de 1 a 3 e de 6 a 8 representam situações onde não foram estabelecidas metas semanais de produção para as atividades silviculturais. Nesses casos, o sinal de menor ou igual ( $\leq$ ) das restrições numeradas de (3) a (13) e de (35) a (45) foi substituído pelo sinal de igualdade ( $=$ ), pois devido à natureza da função objetivo dos modelos propostos, a solução dos mesmos seria zero. Nos demais cenários, as restrições foram aplicadas de acordo com as formulações matemáticas apresentadas.

É interessante observar que a utilização do sinal de menor ou igual ( $\leq$ ) permite o abandono de talhões. Caso a igualdade seja imposta, o abandono de área, em quaisquer modelos, fica impossibilitado. A utilização de metas de produção e a possibilidade de abandono de talhões são características comuns ao processo de planejamento e que, portanto, direcionam para o uso das restrições com sinal de menor ou igual ( $\leq$ ).

### 5.8 Processamento e comparação dos cenários

Os cenários propostos foram processados em um microcomputador com processador Intel Core i5 2,53GHz com 6,00 GB de memória RAM e 450 GB de

HD. A formulação dos problemas de programação linear inteira e contínua e a solução dos mesmos foram realizadas pelo programa LINGO<sup>®</sup> (LINDO Systems Inc), versão 13.0.2.18 de licença educacional.

A comparação dos resultados seguiu uma avaliação da função objetivo e de critérios técnicos silviculturais, para a tomada de decisão.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos a partir do processamento dos cenários sugeridos foram apresentados considerando dois objetivos distintos: comprovação da consistência dos modelos e comparação entre os modelos desenvolvidos.

### **6.1 Modelo de Programação Linear (PL)**

Os gráficos apresentados na figura 14 apresentam os resultados observados após o processamento do cenário 1. O primeiro mostra as áreas selecionadas pelo modelo para cada um dos talhões associados à situação operacional I. O resultado deixou evidente que os 26 talhões tiveram 100% de suas áreas realizadas.

Ao analisar os resultados gerados considerando as situações operacionais II e III, foram observadas as mesmas consistências em área. Os gráficos apresentados nas figuras 14(b) e 14(c) confirmam que a integridade das áreas dos talhões também foi respeitada pelo modelo. Portanto, as restrições (3) a (13) se mostraram eficazes para o controle da realização integral dos talhões.

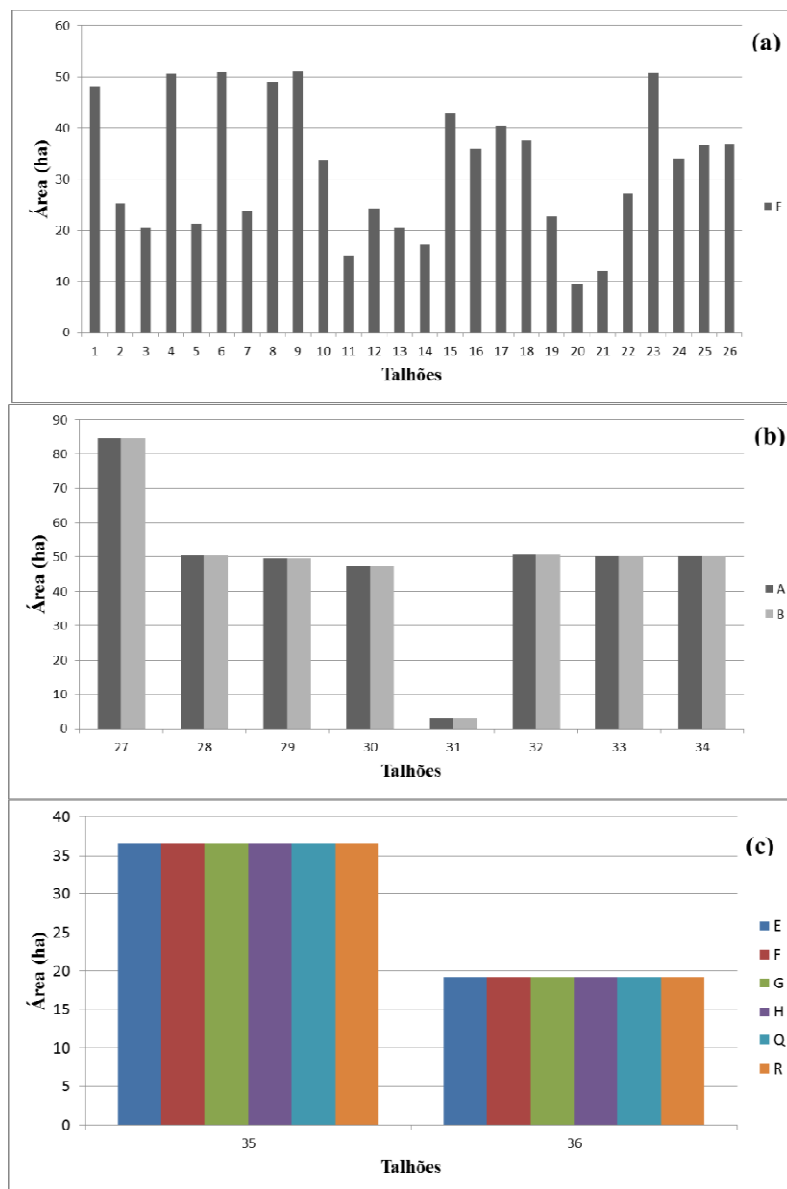


Figura 14 Resultados apresentados após o processamento do cenário 1

Nota: Sendo a) áreas selecionadas por talhão para a atividade de plantio considerando a situação operacional I; b) áreas selecionadas por talhão para as atividades associadas à situação operacional II; e c) áreas selecionadas por talhão para as atividades associadas à situação operacional III.



Entretanto, ao analisar a distribuição das atividades ao longo das semanas, observou-se que as relações de dependência entre as atividades não foram respeitadas, ou seja, tecnicamente, não é possível aplicar este resultado, evidenciando uma necessidade de haver um maior controle no processamento da informação. A figura 15 apresenta a distribuição temporal das atividades recomendadas ao talhão 1 resultante do processamento do cenário 1.

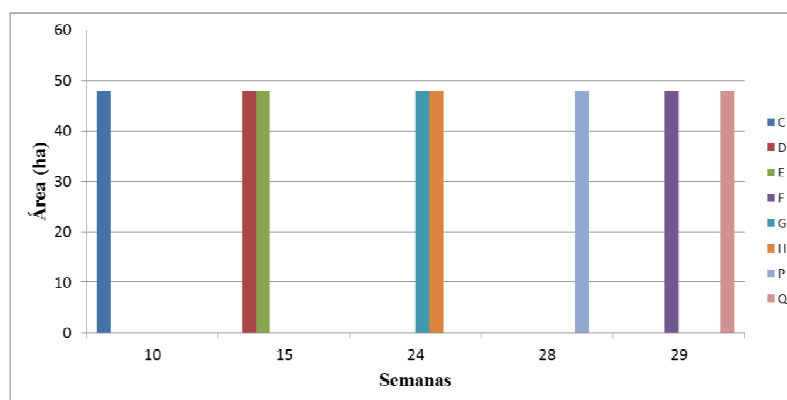


Figura 15 Distribuição temporal incoerente das atividades recomendadas ao talhão 1 resultante do processamento do cenário 1

A análise da figura 15 deixou evidente que os intervalos entre as atividades recomendadas ao talhão 1 não foram atendidos. O intervalo de três semanas recomendado entre as atividades de 2º combate às formigas (D) e a subsolagem (E) não foi respeitado. Estas atividades foram agendadas para ocorrer de forma concomitante, durante a semana 15, deixando claro o desrespeito em relação às recomendações técnicas ilustradas no item 5.3.

Para que as recomendações técnicas entre as atividades pudessem ser respeitadas, foi necessário adicionar restrições para expressar a relação de dependência entre as atividades (cenário 2). Após a inclusão destas restrições, a prescrição técnica do trabalho foi atendida. A figura 16 apresenta a distribuição

temporal das atividades recomendadas ao talhão 1 resultante do processamento do cenário 2.

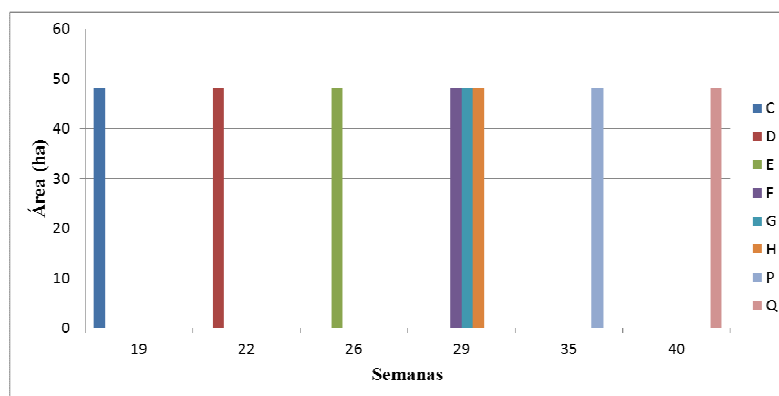


Figura 16 Distribuição temporal coerente das atividades recomendadas ao talhão 1

Portanto, planos silviculturais que não representam detalhes técnicos da prescrição das atividades, podem causar soluções errôneas ao tomador de decisão, comprometendo o plano de metas da empresa.

Uma opção interessante de visualizar a distribuição temporal das atividades é através da utilização do Planejamento Técnico de Atividades Silviculturais (PTAS), disposto no anexo 1. Ao apresentar no PTAS o resultado obtido no cenário 2, constatou-se que, apesar da obediência às prescrições técnicas das atividades, as últimas semanas viáveis de ocorrência de cada atividade foram ativadas pelo modelo, aumentando o prazo de término do projeto. Provavelmente, esta situação não é desejável pela empresa, que, normalmente, busca terminar o trabalho o mais cedo possível, mesmo que os custos operacionais sejam alterados. Uma análise mais criteriosa no anexo 1 permite concluir que os 26 talhões associados à situação operacional I poderiam ser concluídos, na semana 29. Este é o momento mais cedo possível que a última

atividade recomendada aos talhões de 1-26, a capina manual (Q), poderia ser concluída. Uma forma de controlar o momento de início das atividades é apresentada no cenário 4, quando metas semanais de produção são incorporadas ao modelo.

A inexistência da restrição de disponibilidade de recursos permite ao modelo selecionar uma quantidade ilimitada de trabalho ao longo do projeto. Consequentemente, todos os talhões existentes na base de dados foram concluídos durante, somente uma semana. A figura 17(a) ilustra os resultados obtidos no cenário 2 considerando as atividades de subsolagem (E), plantio (F) e capina (Q), recomendadas aos talhões associados às situações operacionais I e III.

De acordo com as informações apresentadas na figura 17(a), o modelo permitiu a realização das atividades de subsolagem (E), plantio (F) e capina manual (Q), em todos os talhões em que essas atividades foram recomendadas, durante as semanas 26, 29 e 40. A área trabalhada nessas semanas destas atividades foi de 836,86 hectares, correspondente ao somatório das áreas dos talhões associados à situação operacional I. Para que esta quantidade de trabalho fosse realizada nessas semanas através da equipe 1, outras 8 máquinas pesadas precisariam ser adquiridas, uma vez que a demanda gerada por este recurso foi de 15 máquinas.

A partir da imposição da restrição de disponibilidade de recursos (cenário 3), a quantidade de trabalho selecionada por semana foi inferior à selecionada anteriormente, conforme apresentado na figura 17(b). A capacidade operacional máxima da empresa considerando os recursos simulados foi de 397,72 ha na semana 15, 159,09 ha na semana 16 e 280,04 ha na semana 17. Este desequilíbrio da capacidade operacional máxima ao longo das semanas está associado à distribuição irregular de dias úteis ao longo das semanas, reflexo da ocorrência de feriados no calendário operacional adotado.

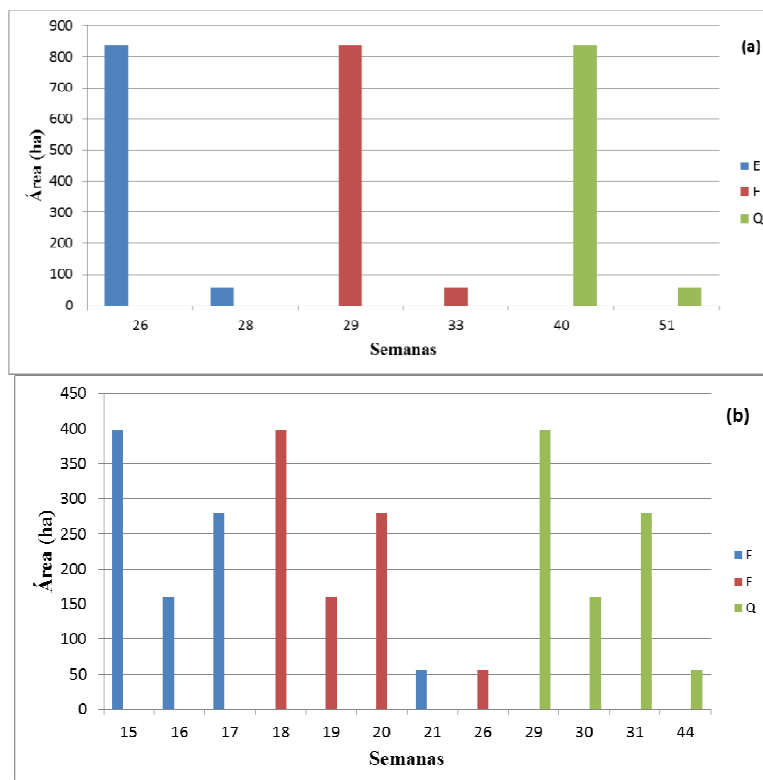


Figura 17 a) Quantidade de trabalho selecionada para as atividades de subsolagem, plantio e capina considerando o cenário 2; b) Quantidade de trabalho selecionada para as atividades de subsolagem, plantio e capina considerando o cenário 3

Fica evidente o efeito gargalo que o calendário operacional impõe ao processo, uma vez que as relações de dependência entre as atividades precisam ser respeitadas. A produção identificada nas semanas 19 e 30, relativa às atividades de plantio (F) e capina manual (Q) respectivamente, foi limitada pela capacidade produtiva da semana 16. Essas semanas, apesar de apresentarem maior quantidade de dias úteis e, consequentemente, maior capacidade produtiva do que a semana 16, tiveram a sua produção limitada à produção máxima da subsolagem na semana 16, sendo esta, 159,09 hectares.

A representação da disponibilidade de recursos da empresa fez com que, a área de 836, 86 ha antes executada durante uma única semana, fosse realizada durante três semanas (Anexo 2). Houve, portanto, uma diluição do trabalho ao longo do tempo, resultante da necessidade de respeito às restrições de área, de dependência entre as atividades e disponibilidade de recursos. A programação de atividades silviculturais que considera as recomendações técnicas e a disponibilidade de recursos traz equilíbrio técnico e operacional ao processo, altamente desejável à gestão do empreendimento.

A diluição do trabalho observada na situação operacional I não foi observada para as situações operacionais II e III. Nessas situações, a demanda total de trabalho foi inferior à capacidade operacional semanal da empresa, viabilizando que todos os talhões fossem concluídos durante 1 semana, conforme apresentado no anexo 2.

Apesar de promover demandas menos concentradas por recursos, a restrição que trata da disponibilidade dos mesmos não oferece ao gestor a possibilidade de definir as quantidades, em área, a serem cumpridas semanalmente de cada atividade. Além disso, não é possível controlar o momento de início das atividades e, conseqüentemente, o momento de término do projeto silvicultural. O encerramento do trabalho na semana mais cedo possível (semana 31) observado na situação operacional I (Anexo 2) foi um evento casual. A restrição de disponibilidade de recursos não permite o controle do momento de início/término das atividades, fato comprovado pela programação dos talhões 35 e 36 apresentada no anexo 2.

O cenário 4 foi proposto para que estas questões fossem representadas pelo modelo. Nesse cenário, foi simulada uma situação envolvendo metas de produção voltadas para a utilização da capacidade operacional semanal máxima da empresa, garantindo ainda, o encerramento do projeto no momento mais cedo possível. A tabela 6 apresenta as metas aplicadas no cenário 4.

Tabela 6 Metas semanais, em área (ha), por situação operacional, simuladas no cenário 4 para utilizar a capacidade operacional máxima da empresa e para terminar o projeto o mais cedo possível

| Situação Operacional | Atividade | Semanas (Área, ha) |        |        |        |        |
|----------------------|-----------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
|                      |           | 4                  | 18     | 19     | 20     | 40     |
| I                    | F         | -                  | 397,72 | 159,09 | 280,04 | -      |
| II                   | A         | -                  | -      | -      | -      | 385,73 |
| III                  | F         | 55,8               | -      | -      | -      | -      |

A figura 18 apresenta os resultados obtidos após o processamento do cenário 4. As atividades associadas às situações operacionais I, II e III foram planejadas de forma sequencia da, respeitando as recomendações técnicas da empresa. Além disso, as quantidades de trabalho selecionadas ao longo das semanas foram condizentes com a capacidade operacional máxima da empresa, garantindo que todos os talhões envolvidos no processo fossem concluídos o mais cedo possível. O anexo 3 apresenta o cronograma de trabalho onde são identificadas as semanas selecionadas pelo modelo resultante do processamento do cenário 4, correspondente à tabela 6.

Este ordenamento operacional das atividades e a definição de metas periódicas de produção alinhadas com as limitações operacionais da empresa permitem ao gestor florestal equalizar as demandas de trabalho com a capacidade de execução da empresa, contribuindo para regulação do processo silvicultural.

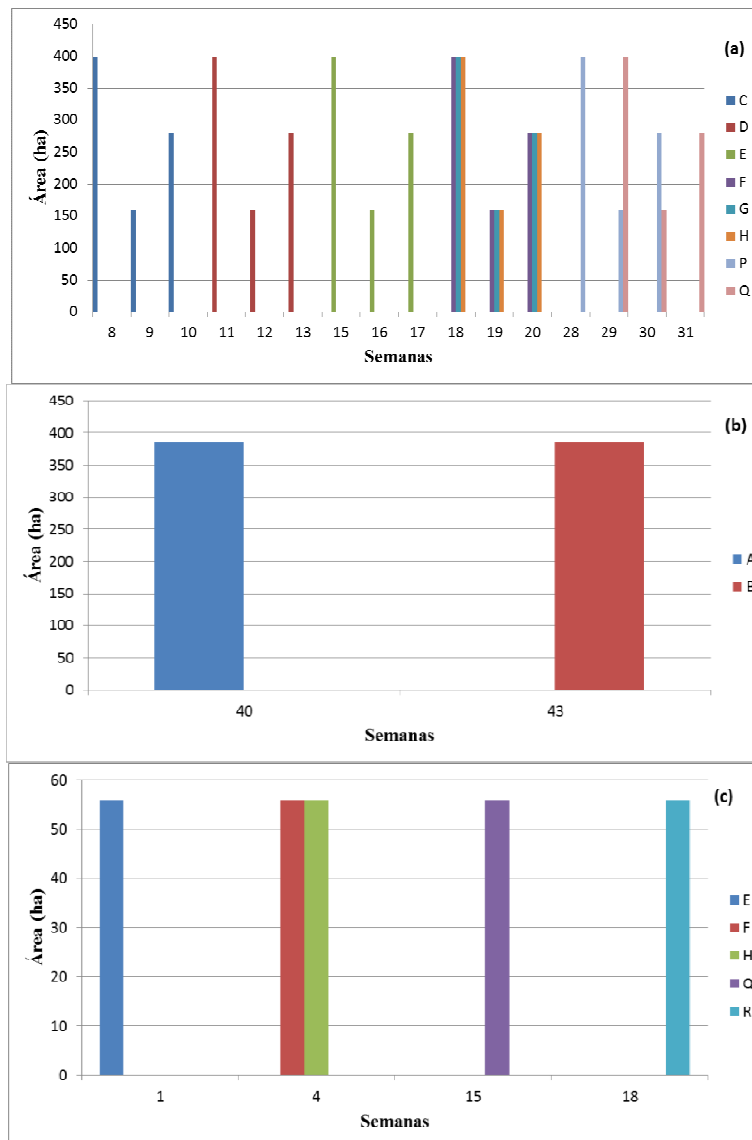


Figura 18 Resultados obtidos após o processamento do cenário 4

Nota: Sendo a) áreas a serem realizadas por semana considerando os talhões associados à situação operacional I; b) áreas a serem realizadas por semana considerando os talhões associados à situação operacional II; e c) áreas a serem realizadas por semana considerando os talhões associados à situação operacional III

O detalhamento da informação a nível de talhão apresentado na figura 18, permite uma compreensão mais abrangente sobre os resultados gerados no cenário 4. As informações apresentadas na forma gráfica na figura 18 (a), (b) e (c), foram decompostas nas tabelas 7 e 8, sendo a tabela 7 correspondente à figura 18 (a) e a tabela 8 correspondente às figuras 18 (b) e (c). Para facilitar a visualização dessas informações, somente a primeira atividade de cada situação operacional foi detalhada. Devido à relação de dependência entre as atividades, as quantidades selecionadas por talhão para as demais atividades são idênticas e, por isso, não precisaram ser representadas nas tabelas. Assim, a tabela 7 apresenta, a nível de talhão, a programação da atividade C referente à situação operacional I, enquanto que a tabela 8 apresenta, a nível de talhão, a programação das atividades A e E, associadas, respectivamente, às situações operacionais II e III.

Ao analisar a tabela 7, observou-se um fracionamento do trabalho programado para os talhões 4 e 6. Esses talhões, apesar de iniciados na semana 8, foram concluídos em semanas diferentes, sendo que o talhão 6 foi concluído na semana 9 e o talhão 4 encerrado na semana 10.

A realização fracionada de talhões ao longo do projeto silvicultural, pode, inicialmente, desestimular o uso do modelo de PL como ferramenta para o planejamento anual de atividades silviculturais. Entretanto, esse plano possui um caráter mais tático, do que operacional. O modelo desenvolvido busca identificar “o que” deve ser feito (qual atividade), “quando” o trabalho deve ocorrer, “quanto” deve ser realizado de cada atividade e “quem” deve realizar o serviço, não importando “onde” o trabalho é realizado.

O objetivo principal é subsidiar o processo de tomada de decisão, identificando se há capacidade operacional de realizar certa quantidade de trabalho. Além disso, o plano anual de atividades silviculturais deve considerar



as recomendações técnicas das atividades e imposição de metas periódicas de produção, abrindo discussão sobre um novo termo: “Regulação Silvicultural”.

Tabela 7 Áreas a serem realizadas da atividade C considerando os talhões associados à situação operacional I

| Semana             | Talhão | Área Total (ha) | Área Atividade C (ha) | Fracionamento do talhão entre semanas |
|--------------------|--------|-----------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 8                  | 4      | 50,57           | 39,67                 | Sim                                   |
|                    | 6      | 50,76           | 8,88                  | Sim                                   |
|                    | 15     | 42,95           | 42,95                 | Não                                   |
|                    | 16     | 35,93           | 35,93                 | Não                                   |
|                    | 17     | 40,35           | 40,35                 | Não                                   |
|                    | 18     | 37,43           | 37,43                 | Não                                   |
|                    | 19     | 22,63           | 22,63                 | Não                                   |
|                    | 20     | 9,47            | 9,47                  | Não                                   |
|                    | 21     | 12,02           | 12,02                 | Não                                   |
|                    | 22     | 27,05           | 27,05                 | Não                                   |
|                    | 23     | 50,72           | 50,72                 | Não                                   |
|                    | 24     | 34,08           | 34,08                 | Não                                   |
|                    | 25     | 36,55           | 36,55                 | Não                                   |
| <b>Subtotal</b>    | -      | -               | <b>397,72</b>         | -                                     |
| 9                  | 6      | 50,76           | 41,88                 | Sim                                   |
|                    | 8      | 48,98           | 48,98                 | Não                                   |
|                    | 9      | 50,99           | 50,99                 | Não                                   |
|                    | 14     | 17,24           | 17,24                 | Não                                   |
| <b>Subtotal</b>    | -      | -               | <b>159,09</b>         | -                                     |
| 10                 | 1      | 48,06           | 48,06                 | Não                                   |
|                    | 2      | 25,29           | 25,29                 | Não                                   |
|                    | 3      | 20,52           | 20,52                 | Não                                   |
|                    | 4      | 50,57           | 10,90                 | Sim                                   |
|                    | 5      | 21,24           | 21,24                 | Não                                   |
|                    | 7      | 23,81           | 23,81                 | Não                                   |
|                    | 10     | 33,66           | 33,66                 | Não                                   |
|                    | 11     | 15,04           | 15,04                 | Não                                   |
|                    | 12     | 24,23           | 24,23                 | Não                                   |
|                    | 13     | 20,49           | 20,49                 | Não                                   |
| 26                 | 36,80  | 36,80           | Não                   |                                       |
| <b>Subtotal</b>    | -      | -               | <b>280,04</b>         | -                                     |
| <b>Total Geral</b> | -      | -               | <b>836,86</b>         | -                                     |

A espacialização dos resultados apresentados na tabela 7 é importante para que os possíveis deslocamentos das equipes de campo possam ser avaliados (Figura 19). O mapa ilustrado nessa figura deixa claro que o modelo não considerou a possibilidade de formação de arranjos ou agrupamentos entre talhões, o que pode aumentar o valor final do custo na função objetivo, se os deslocamentos das equipes fossem considerados.

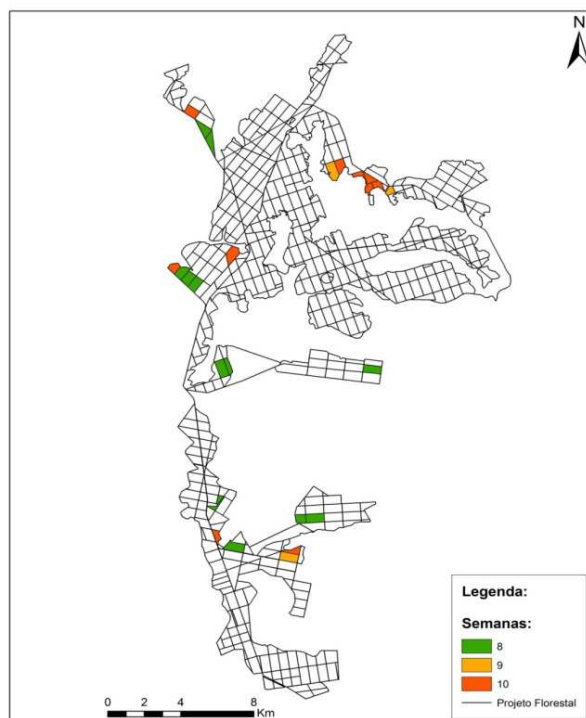


Figura 19 Distribuição semanal dos talhões a serem submetidos à atividade C, considerando a situação operacional I.

Entretanto, o modelo não perde sua validade já que se trabalha a nível tático. Assim, para que as metas impostas fossem cumpridas, talhões localizados distantes um dos outros tiveram de ser selecionados pelo modelo.

Modelos operacionais de planejamento onde as informações são detalhadas a nível diário podem utilizar as informações geradas pelo modelo proposto, desde que os talhões selecionados e as quantidades programadas por semana sejam respeitados. A sequência de deslocamento das equipes de campo entre os talhões também pode ser considerada durante o planejamento operacional de atividades silviculturais.

A programação das atividades associadas aos talhões pertencentes às situações operacionais II e III é apresentada na tabela 8. Nessas situações, não houve fracionamento do trabalho já que foi possível concluir todos os talhões durante uma semana. Em situações reais, onde um grande número de talhões com o mesmo histórico operacional ocorre, trabalhos fracionados ao longo do tempo devem ocorrer. Os anexos 4 e 5 apresentam a distribuição espacial dos talhões associados às situações operacionais II e III, respectivamente.

Tabela 8 Áreas a serem realizadas da atividade A e E considerando os talhões associados às situações operacionais II e III

| Situação Operacional | Atividade | Semana | Talhão | Área Total (ha) | Área Atividade (ha) | Fracionamento do talhão entre semanas |
|----------------------|-----------|--------|--------|-----------------|---------------------|---------------------------------------|
| II                   | A         | 40     | 27     | 84,35           | 84,35               | Não                                   |
|                      |           |        | 28     | 50,30           | 50,30               | Não                                   |
|                      |           |        | 29     | 49,59           | 49,59               | Não                                   |
|                      |           |        | 30     | 47,37           | 47,37               | Não                                   |
|                      |           |        | 31     | 3,21            | 3,21                | Não                                   |
|                      |           |        | 32     | 50,48           | 50,48               | Não                                   |
|                      |           |        | 33     | 50,26           | 50,26               | Não                                   |
|                      |           |        | 34     | 50,17           | 50,17               | Não                                   |
| <b>Subtotal</b>      |           |        |        | <b>385,73</b>   |                     |                                       |
| III                  | E         | 1      | 35     | 36,57           | 36,57               | Não                                   |
|                      |           |        | 36     | 19,23           | 19,23               | Não                                   |
| <b>Subtotal</b>      |           |        |        | <b>55,80</b>    |                     |                                       |

As equipes com menor custo foram selecionadas para a realização das onze atividades silviculturais, independente do rendimento operacional.

Portanto, a equipe 1 de cada atividade foi selecionada para desempenhar o trabalho em todos os 36 talhões estudados.

Caso a disponibilidade de recursos fosse diminuída e a quantidade de talhões e as metas de produção fossem aumentadas, a equipe 2 poderia ser selecionada. Essa equipe representa equipes contendo maior número de recursos e, com isso, possuem melhor rendimento e maior custo.

Portanto, variações nos parâmetros meta, tempo de execução do projeto e quantidade de talhões, tendem a direcionar mudanças em relação à escolha das equipes por parte do modelo.

A identificação da alocação das equipes de campo ao longo do projeto florestal gerada pelo planejamento a nível tático também pode ser útil ao planejamento operacional das atividades silviculturais. O anexo 6 apresenta esta alocação de recursos, identificando a programação das equipes de campo por atividade, ao longo do tempo de execução do projeto. Devido ao número reduzido de talhões abordados, foram identificados períodos onde não houve alocação de recursos, especialmente, nos meses de maio, agosto, outubro, novembro e dezembro. Conforme a dimensão do projeto silvicultural é aumentada e diversas situações operacionais ocorram, a alocação dos recursos tende a ser equilibrada ao longo do tempo, viabilizando períodos constantes de execução de atividades, atingindo, enfim a “Regulação Silvicultural”.

O cálculo da área total a ser submetida às operações silviculturais pode ser realizado através do anexo 3 e das tabelas 7 e 8. A partir do anexo, é possível determinar a quantidade de atividades programadas por situação operacional. Oito atividades silviculturais (C, D, E, F, G, H, P e Q) foram programadas para os talhões associados à situação operacional I, duas atividades (A e B) foram programadas para os talhões associados à situação operacional II e cinco atividades (E, F, H, Q e R) foram programadas para os talhões associados à situação operacional III. A atividade G (Irrigação) não foi programada para os

talhões associados à situação operacional III, pois o plantio nestes locais ocorreu na época chuvosa, dispensando o uso desta atividade. As tabelas 7 e 8 informam a área total programada por atividade e situação operacional. De acordo com a tabela 7, uma área 836,86 ha deve ser trabalhada para cada atividade associada à situação operacional I. Conforme apresentado no anexo 3, oito atividades precisam ser conduzidas nos talhões associados à situação operacional I, totalizando uma área total a ser trabalhada de 6.694,88 ha. As áreas a serem trabalhadas por atividade considerando as situações operacionais II e III podem ser obtidas a partir da tabela 8. As áreas totais a serem trabalhadas considerando todas as atividades envolvidas nas situações operacionais II e III, foram, respectivamente, de 771,46 ha e 279,00 ha.

Assim, a área total a ser realizada considerando todas as atividades silviculturais associadas às três situações operacionais estudadas foi de 7.745,34 ha. Considerando que a área total do projeto florestal é de 1.278,39 ha, pode-se inferir que, para o caso estudado, para cada hectare a ser colhido futuramente nesta área foi necessário realizar 6,06 hectares em atividades silviculturais. Logo, ao considerar uma fábrica que consome em madeira, o volume equivalente a equivalente a 10.000 hectares, seria necessário executar 60.600 hectares em atividades silviculturais. Ao considerar um custo médio de R\$1.500,00/ha por atividade silvicultural, o custo anual para a implantação ou reforma dessa área supera R\$90.000.000,00.

A relação entre a área a ser colhida e a área a ser submetida às atividades silviculturais sofre alterações dependendo da quantidade de atividades recomendadas por talhão, sendo esta diretamente associada ao histórico operacional da área. Situações onde a intenção de manejo é a condução da floresta, a quantidade de atividades silviculturais recomendadas é significativamente diminuída, afetando a relação identificada nesse trabalho.

Esses números, apesar de apresentarem situações específicas de manejo, revelam a importância de se utilizar ferramentas de otimização durante o planejamento de atividades silviculturais para apoiar o processo de tomada de decisão.

A partir dos resultados encontrados no cenário 4, foi possível elaborar o planejamento anual otimizado físico e financeiro do projeto florestal. O primeiro plano (Tabela 9) identifica as áreas que devem ser realizadas mensalmente de cada uma das atividades silviculturais ao longo do ano, enquanto que o segundo (Tabela 10), apresenta a previsão de despesas a serem geradas a partir da aprovação do plano físico.

Caso as metas estabelecidas no cenário 4 (Tabela 6) representasse uma demanda de serviços silviculturais, a empresa prestadora do serviço precisaria, antes de fechar o contrato, avaliar a viabilidade operacional e econômica do projeto florestal. Mais especificamente, seria crítico para essa empresa determinar qual o preço a ser cobrado de cada atividade, para que seja atingida uma lucratividade mínima sobre o projeto.

A restrição (32), abordada no cenário 5, permite que o gestor florestal elabore planos anuais compatíveis com uma lucratividade mínima almejada sobre o projeto.

O cronograma de trabalho resultante do processamento do cenário 4 (Anexo 6), deixa claro que somente a equipe 1, de cada atividade, foi selecionada pelo modelo. O lucro esperado sobre o projeto florestal, nesse caso, foi de R\$637.325,60, referente à margem de rentabilidade de 5% imposta sobre a receita bruta total do projeto apresentada na tabela 10.

Ao impor ao modelo um lucro esperado de R\$769.600,00, equivalente a 6,04% de lucratividade líquida sobre o projeto, mudanças significativas na seleção das equipes de trabalho foram observadas. A equipe 2 representou a maior parte (63,70%) das equipes selecionadas. O anexo 7 apresenta o

cronograma de trabalho das equipes capaz de atingir a lucratividade de R\$769.600,00. A utilização destas equipes resulta em maior rentabilidade para a empresa. As equipes 1 e 2 de plantio (F) foram selecionadas para trabalhar na semana 4, deixando evidente que um houve fracionamento do trabalho (Anexo 7).

O problema se mostrou infactível para lucros superiores a R\$770.000,00, ou seja, para que quantias superiores a esta sejam alcançadas os preços cobrados por atividade precisam ser aumentados e/ou os custos operacionais diminuídos. A formação de outras equipes, mais eficientes do que as consideradas no trabalho, pode alcançar a lucratividade mínima desejada sem que os custos e ou/preços sejam alterados.

Tabela 9 Planejamento anual físico otimizado de atividades silviculturais, identificando a área (ha) a ser realizada de cada atividade ao longo do ano

| Atividade         | Dez   | Jan    | Fev      | Mar      | Abr      | Jun    | Jul    | Set    | Total (ha) |
|-------------------|-------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|------------|
| A                 |       |        |          |          |          |        |        | 385,73 | 385,73     |
| B                 |       |        |          |          |          |        |        | 385,73 | 385,73     |
| C                 |       |        | 836,86   |          |          |        |        |        | 836,86     |
| D                 |       |        | 397,72   | 439,14   |          |        |        |        | 836,86     |
| E                 | 55,80 |        |          | 556,81   | 280,05   |        |        |        | 892,66     |
| F                 |       | 55,80  |          |          | 836,86   |        |        |        | 892,66     |
| G                 |       |        |          |          | 836,86   |        |        |        | 836,86     |
| H                 |       | 55,80  |          |          | 836,86   |        |        |        | 892,66     |
| P                 |       |        |          |          |          | 556,81 | 280,05 |        | 836,86     |
| Q                 |       |        |          | 55,80    |          | 397,72 | 439,14 |        | 892,66     |
| R                 |       |        |          |          | 55,80    |        |        |        | 55,80      |
| <b>Total (ha)</b> | 55,80 | 111,60 | 1.234,58 | 1.051,75 | 2.846,43 | 954,53 | 719,19 | 771,46 | 7.745,34   |

Tabela 10 Planejamento anual financeiro otimizado de atividades silviculturais, identificando a previsão mensal de gastos (R\$) por atividade ao longo do ano

| Atividade          | Dez       | Jan        | Fev          | Mar        | Abr          | Jun          | Jul          | Set          | Total (R\$)   |
|--------------------|-----------|------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| A                  |           |            |              |            |              |              |              | 772.231,46   | 772.231,46    |
| B                  |           |            |              |            |              |              |              | 386.115,73   | 386.115,73    |
| C                  |           |            | 1.675.393,72 |            |              |              |              |              | 1.675.393,72  |
| D                  |           |            | 398.117,72   | 439.569,13 |              |              |              |              | 837.686,85    |
| E                  | 48.612,96 |            |              | 485.092,87 | 243.970,85   |              |              |              | 777.676,68    |
| F                  |           | 132.335,28 |              |            | 1.984.697,18 |              |              |              | 2.117.032,46  |
| G                  |           |            |              |            | 769.116,18   |              |              |              | 769.116,18    |
| H                  |           | 132.289,25 |              |            | 1.984.006,77 |              |              |              | 2.116.296,02  |
| P                  |           |            |              |            |              | 324.286,14   | 163.095,30   |              | 487.381,44    |
| Q                  |           |            |              | 164.052,00 |              | 1.169.296,80 | 1.291.042,20 |              | 2.624.391     |
| R                  |           |            |              |            | 183.267,18   |              |              |              | 183.267,18    |
| <b>Total (R\$)</b> | 48.612,96 | 264.624,53 | 2.073.511,44 | 1.088.714  | 5.165.058,16 | 1.493.582,94 | 1.454.137,5  | 1.158.347,19 | 12.746.588,72 |



## 6.2 Modelo de Programação Linear Inteira (PLI)

O cenário 6 apresentou resultados idênticos aos resultados apresentados no cenário 1, ilustrados na Figura 14 (a), (b), (c). Áreas integrais dos talhões de cada uma das situações operacionais estudadas foram ativadas. Portanto, a utilização das restrições (33) a (43) se mostrou eficaz para conferir integridade em área ao modelo, ou seja, é possível garantir que todo o talhão será trabalhado.

Além disso, a inexistência da restrição de dependência entre as atividades também resultou em programações de trabalho não coerentes com as recomendações técnicas das atividades.

Após a inclusão da restrição de dependência entre as atividades (cenário7), os intervalos entre as atividades foram respeitados. Resultados similares aos encontrados no modelo de PL foram observados. As quantidades de trabalho programadas semanalmente para o talhão1 selecionadas pelos modelo PL e PLI foram as mesmas (Figura 16).

A partir do cenário 8, quando foram adicionadas as restrições de disponibilidade de recursos, diferentes resultados entre os modelos de PL e PLI foram observados. A capacidade operacional máxima ativada pelo modelo de PLI foi inferior à capacidade selecionada pelo modelo de PL. Utilizando o modelo representado pela variável de decisão contínua, foi possível realizar 397,72 hectares de subsolagem na semana 15 (Figura 17b). Quando o modelo de PLI foi utilizado, a capacidade máxima, na mesma semana e atividade, foi de 382,87 hectares (Figura 20a). A justificativa deste fato está associada à natureza da variável de decisão do modelo de PLI. Por se tratar de uma variável de decisão binária, a capacidade máxima de trabalho está limitada ao fato de existirem talhões na base de dados que, tendo suas áreas somadas, apresentem

área correspondente à verdadeira capacidade máxima operacional, no caso, 397,72 ha.

Dessa forma, a partir da capacidade operacional máxima ativada pelo modelo de PLI (382,87 ha), pode-se inferir que, não foram encontrados na base de dados, talhões que, tendo suas áreas somadas, apresentassem área complementar à capacidade operacional máxima, sendo esta área de 14,85 ha. A figura 20b comprova esta suposição, onde são apresentados os talhões que foram ativados para sofrerem a atividade de subsolagem na semana 15 pelo modelo de PLI. Em outras palavras, não foram selecionados os talhões 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 17, 26, 35 e 36 para serem submetidos à atividade de subsolagem durante a semana 15. Nenhum desses talhões possui área igual ou inferior a 14,85 ha (tabela 1), resultando em uma subestimação da capacidade produtiva quando utilizado o modelo com variável de decisão binária. Assim, por não permitir o fracionamento de talhões, o modelo de PLI subestima a capacidade produtiva da empresa, sendo esta uma característica indesejável.

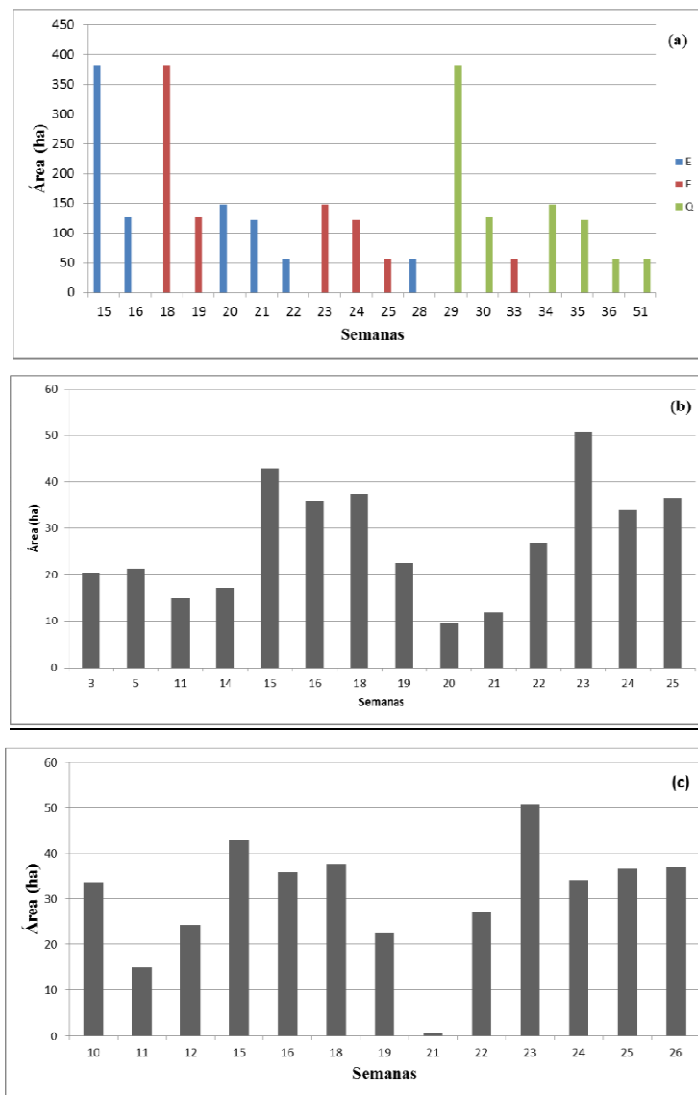


Figura 20 Resultados observados após o processamento dos modelos

Nota: Sendo a) identificação da capacidade operacional máxima para as atividades de subsolagem, plantio e capina considerando a aplicação do modelo de PLI; b) talhões ativados para atividade de subsolagem durante a semana 15 considerando modelo de PLI; c) talhões selecionados para atividade de subsolagem durante a semana 15 considerando modelo de PL

Outra diferença observada entre os modelos de PL e PLI após a inclusão da restrição de disponibilidade de recursos (cenários 3 e 8, respectivamente), refere-se ao conjunto e ao número de talhões selecionados/ativados. A figura 20c apresenta os talhões selecionados pelo modelo de PL para serem submetidos à atividade de subsolagem na semana 15 enquanto que a figura 20b apresenta os talhões selecionados pelo modelo de PLI para serem submetidos à mesma atividade e semana. Fica evidente que o conjunto de talhões selecionados nos dois casos foi bastante diferente. Por outro lado, o número de talhões selecionados pelos modelos foi muito próximo, sendo que o modelo de PL selecionou 13 talhões e o modelo de PLI ativou 14 talhões.

Pode-se concluir que, a possibilidade de fracionamento do trabalho nos talhões entre semanas, permitida pelo modelo de PL, potencializa a utilização da capacidade operacional máxima da empresa, permitindo que o projeto seja encerrado mais cedo. A utilização da capacidade operacional máxima por parte do modelo de PL permitiu que os talhões associados às situações operacionais I e III, fossem concluídos na semana 44 (figura 17b), enquanto que, ao utilizar o modelo de PLI, o projeto foi encerrado, somente, na semana 51 (figura 20a). Em razão desse aproveitamento, a utilização do modelo de PL para suportar o processo de planejamento a nível tático de atividades silviculturais é mais interessante.

O cenário 9 seguiu a mesma lógica aplicada no cenário 4, ou seja, as áreas impostas como metas corresponderam ao valor da capacidade operacional máxima identificada nos cenários anteriores (cenários 3 e 8). Além disso, as semanas em que as metas foram impostas também representaram o momento mais cedo possível de início das atividades. A tabela 12 apresenta as metas impostas por atividade utilizadas para o processamento do cenário 9.

Tabela 11 Metas semanais, em área, por situação operacional, simuladas no cenário 9

| Situação Operacional | Atividade | Semanas (Área, ha) |        |        |        |        |       |        |
|----------------------|-----------|--------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
|                      |           | 4                  | 18     | 19     | 23     | 24     | 25    | 40     |
| I                    | F         | -                  | 382,87 | 126,13 | 148,15 | 122,24 | 57,47 | -      |
| II                   | A         | -                  | -      | -      | -      | -      | -     | 385,73 |
| III                  | F         | 55,8               | -      | -      | -      | -      | -     | -      |

Avaliando o tempo de processamento, constatou-se uma superioridade da eficiência do modelo de PL quando comparado ao modelo de PLI, pois, após cinco horas de processamento, o modelo de PLI não encontrou uma solução ótima. Devido a esse longo período, o processamento foi interrompido, acarretando na inexistência de soluções para serem analisadas.

O processamento do cenário 10 também precisou ser interrompido, o que reforça a necessidade de se trabalhar outros métodos de processamento, como as meta heurísticas, quando variáveis binárias são propostas. A tabela 12 apresenta os dados referentes ao processamento dos modelos desenvolvidos abordando os 10 cenários simulados.

Tabela 12 Dados referentes ao processamento dos modelos desenvolvidos

| Cenário | NVD   | Numero de Restrições (NR) |      |     |     |   |       | FO (R\$)      | Tempo (s) |
|---------|-------|---------------------------|------|-----|-----|---|-------|---------------|-----------|
|         |       | A I                       | D    | DR  | M   | R | Total |               |           |
| 1       | 4.602 | 236                       | -    | -   | -   | - | 236   | 12.746.588,72 | 2         |
| 2       | 4.602 | 236                       | 2384 | -   | -   | - | 2.620 | 12.746.588,72 | 19        |
| 3       | 4.602 | 236                       | 2384 | 165 | -   | - | 2.785 | 12.746.588,72 | 21        |
| 4       | 4.602 | 236                       | 2384 | 165 | 206 | - | 2.991 | 12.746.588,72 | 22        |
| 5       | 4.602 | 236                       | 2384 | 165 | 206 | 1 | 2.992 | 15.392.000,00 | 22        |
| 6       | 4.602 | 236                       | -    | -   | -   | - | 236   | 12.746.588,72 | 2         |
| 7       | 4.602 | 236                       | 2384 | -   | -   | - | 2.620 | 12.746.588,72 | 20        |
| 8       | 4.602 | 236                       | 2384 | 165 | -   | - | 2.785 | 12.746.588,72 | 20        |
| 9       | 4.602 | 236                       | 2384 | 165 | 206 | - | 2.991 | S             | ∞         |
| 10      | 4.602 | 236                       | 2384 | 165 | 206 | 1 | 2.992 | S             | ∞         |

Em que: NVD representa o número de variáveis de decisão do modelo, A|I as restrições de área (PL)\integridade (PLI), D as restrições de dependência entre as atividades, DR as restrições de disponibilidade de recursos, M as restrições de metas, R a restrição de receita, FO(R\$) o valor da função objetivo em reais, Tempo(s) o período gasto em segundos para o processamento do modelo e S sem solução factível após 5 horas de processamento.

Os modelos desenvolvidos nesse trabalho se apresentam como ferramentas de apoio à tomada de decisão, ao nível tático do planejamento, tendo como objetivo a regulação do processo silvicultural. Dessa forma, pensando nos três níveis hierárquicos de planejamento (estratégico, tático e operacional) e envolvendo a regulação florestal, fica evidente a necessidade de integração das atividades de colheita e silvicultura dentro destes níveis. O resultado inspira ações em conjunto de curto e médio prazo, entre esses setores da empresa florestal, de forma harmoniosa, e assim, possibilitando um direcionamento aos objetivos estratégicos da empresa.

Avaliando as características do planejamento estratégico, este busca, essencialmente, regular a produção florestal, de forma a garantir a oferta contínua de madeira para a indústria, maximizando a receita líquida advinda da floresta, a longo prazo, considerando um período entre 20 e 25 anos para plantios de eucalipto no Brasil. No nível inferior, encontra-se o planejamento tático da colheita florestal, que utiliza os resultados obtidos no planejamento

estratégico para realizar o agendamento da colheita a médio prazo, normalmente considerando um horizonte de planejamento (HP) de 5 anos.

A integração entre o estratégico silvicultural e tático da colheita, consiste no fato que o plantio das áreas agendadas para o corte, deve ocorrer periodicamente, à medida que a colheita ocorre. A formação de novos estoques produtivos busca a reposição contínua e constante das áreas, sendo o planejamento tático da colheita input desse processo. Logo, o planejamento estratégico da silvicultura apresenta-se com um “espelho” do agendamento da colheita, útil para direcionar ações silviculturais, a longo prazo. O descompasso temporal entre os planos estratégicos da colheita e silvicultura (Figura 21) está em virtude do nível de detalhamento exigido, pois pensar exclusivamente, em área plantada anualmente, incorre de valores prejudiciais à gestão do recurso, conforme descrito nos cenários 1 e 2. Por outro lado, equiparar temporalmente os dois ambientes, pode acarretar em formulações matemáticas de grande dimensão, cujo esforço talvez não seja tão proveitoso, tendo em vista mudanças tecnológicas e de recomendações silviculturais em curto espaço de tempo. Outro fato a ser observado, e que comprova a ideia defendida, é que dificilmente a implantação da floresta ocorrerá no mesmo ritmo em que a floresta for colhida, por considerar um número maior de atividades relacionadas. Além disso, a rotação silvicultural é outro aspecto importante no planejamento estratégico para a colheita, e por isso surgem longos horizontes, o mesmo não ocorrendo para as atividades silviculturais de implantação/reforma, já que sua base de ação consiste apenas na liberação das áreas no pós-colheita.

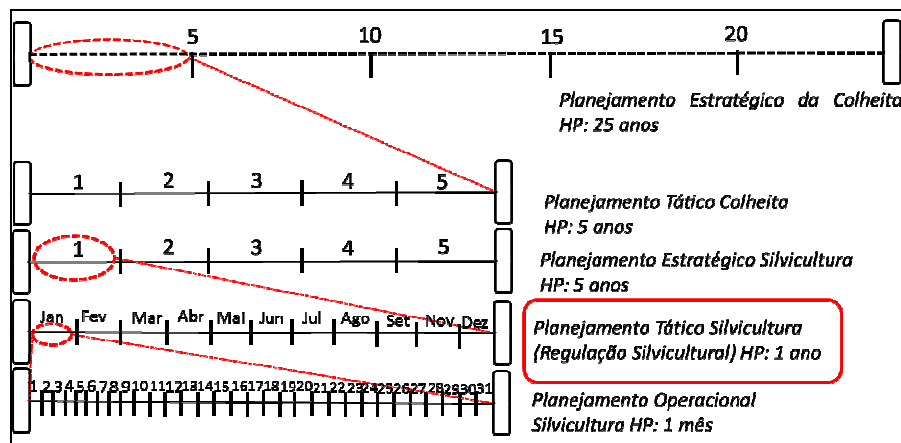


Figura 21 Localização do planejamento tático de atividades silviculturais considerando a estrutura do planejamento florestal hierárquico

Assim, sugere-se que o planejamento tático de atividades silviculturais tenha um horizonte de planejamento de um ano, com periodicidade mensal. O detalhamento em nível diário é abordado durante o planejamento operacional, onde tarefas mais rotineiras são consideradas, envolvendo rotas de deslocamento das equipes, entre outras questões.

Logo, o objetivo do planejamento anual de atividades silviculturais é estabelecer planos regulares de plantio, compatíveis com o ritmo de colheita da floresta e com a capacidade de execução das tarefas silviculturais, surgindo então o conceito de regulação silvicultural das atividades ao longo do tempo.

A regulação silvicultural, quando atingida, pode resultar em demandas por recursos (mão-de-obra, máquinas, mudas, insumos) mais homogêneas ao longo do tempo, situação altamente desejável em qualquer empreendimento florestal, conforme apresentado nos modelos testados.



## 7 CONCLUSÕES

Os modelos desenvolvidos foram capazes de dimensionar as equipes que resultam no menor custo operacional de atividades silviculturais possível. Além disso, as atividades foram sequenciadas no tempo de forma a respeitar as relações de dependência entre as atividades silviculturais.

Além de respeitar as restrições técnicas das atividades, os planos físicos e financeiros elaborados consideram as limitações operacionais da empresa e a imposição de metas periódicas de execução.

A lucratividade mínima esperada a partir da realização de projetos silviculturais considerando situações de prestação de serviços foi devidamente representada durante o processo de planejamento anual de atividades silviculturais.

Equipes com formações distintas foram selecionadas à medida que diferentes cenários foram simulados. O aumento da lucratividade esperada pelo projeto direcionou a seleção de equipes que possuem melhor relação receita/custo.

O modelo de Programação Linear (PL) se mostrou mais adequado para ser utilizado como ferramenta de apoio ao planejamento anual otimizado de atividades silviculturais, quando comparado ao modelo de Programação Linear Inteira (PLI). Este modelo pode ser usado para qualquer tamanho de projeto contribuindo significativamente para o processo de tomada de decisão.

A regulação do processo silvicultural é essencial para compatibilizar as demandas de plantio e a capacidade de execução da empresa. Benefícios estratégicos podem ser alcançados, caso a regulação silvicultural seja devidamente implantada.

## REFERÊNCIAS

BANHARA, J. R. Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucalipto sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático. 2009. 166 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: a review. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 188, p. 145-173, 2005.

BATEMAN, T. S.; SNELL, S. A. Administração: construindo vantagem competitiva. São Paulo: Atlas, 1998. 539 p.

BINKOWSKI, P. Conflitos ambientais e significados sociais em torno da expansão da silvicultura de eucalipto na “Metade Sul” do Rio Grande do Sul. 2009. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Ciências Econômicas, Porto Alegre, 2009.

BOARETTO, M. A. C.; FORTI, L. C. Perspectivas no controle de formigas cortadeiras. *Série Técnica IPEA*, São Paulo, v. 11, n. 30, p. 31-46, maio 1997.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. Decision methods for forest resource management. San Diego: Academic, 2003. 439 p.

CHURCH, R. L.; MURRAY, A. T.; WEINTRAUB, A. Location issues in forest management. *Location Science*, Oxford, v. 6, n. 1-4, p. 137-153, Dec. 1998.

CORRÊA, A. O. de F. Percepções dos principais atores envolvidos no zoneamento ambiental na silvicultura do Rio Grande do Sul: uma perspectiva jurídico institucional. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronegócios)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios, Porto Alegre, 2009.

DIMANDE, C. D. Aceleração de projeto com recursos restritos mediante interrupção de atividades. 2011. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica)-Instituto Alberto Luiz de Coimbra, Rio de Janeiro, 2011.

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

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. Silvicultura do eucalipto. In: \_\_\_\_\_.  
Formação de povamentos florestais. Colombo: Embrapa, 2008. 108 p.

FERREIRA, H. B. Redes de planejamento metodologia e prática com Pert/com e Ms Project. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005. 273 p.

GOLDFARB, D.; TODD, M. J. Linear programming. In: NEMHAUSER, G. L.;  
KAN, A. H. G. R.; TODD, M. J. Optimization. 2<sup>nd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier,  
1989. Cap. 2, v. 1, p. 73-165.

GOMIDE, L. R. Planejamento florestal espacial. 2009. 256 p. Tese (Doutorado  
em Manejo Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Florianópolis, 2009.

GONÇALVES, J. L. M. ; STAPE, J. L. Manejo de resíduos vegetais e preparo  
do solo. In: GONÇALVES, J. L. M. Conservação e cultivo de solos para  
plantações florestais. Piracicaba: IPEF, 2002. 498p.

HILLER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. Introduction to operational research. 8<sup>th</sup> ed.  
New York: McGraw-Hill, 2005. 1061 p.

KEYS, P. (Ed.) Understanding the process of operational research: collected  
readings. Chichester: J. Wiley, 1995. 352 p.

LAUFER, H. et al. Identification of a juvenile hormonelike compound in a  
crustacean. Science, Washington, v. 235, n. 4785, p. 202–205, 1987.

LEUSCHNER, W. A. Introduction to forest resource management. Chichester: J.  
Wiley, 1984. 263 p.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C.  
Colheita florestal. 2. ed. Viçosa: UFV. 2008. Cap 7, p. 185-230.

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

MEDRI, W.; YOTSUMOTO, A. S. Pesquisa operacional na tomada de decisão. 2009. 48 p. Monografia. (Curso de Especialização “Latu Sensu” em Engenharia de Produção. Pesquisa Operacional)-Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

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

NUDTASOMBOOM, N.; RANDHAWA, S. U. Resource-constrained project scheduling with renewable and non-renewable resources and time-resource tradeoffs. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 32, n. 1, p. 227-242, Jan. 1997.

OLIVEIRA, S. L. de. Silvicultura e manejo florestal do eucalipto para produção de carvão vegetal. In: SIMPÓSIO SOBRE ATUALIZAÇÕES NA EUCALIPTOCULTURA, 2011, Lavras. Apresentações... Lavras: UFLA/Plantar, 2011. Slides.

SILVA, P. H. M. da; ANGELI, A. Implantação e manejo de florestas comerciais documentos florestais. Brasília: IPEF, 2006. 13 p. (Documentos Florestais, 18).

RODRIGUEZ, L. C. E. Planejamento agropecuário através de um modelo de programação linear não determinista. 1987. 83 p. Dissertação (Mestrado em Economia Agrária)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1987.

RONNQVIST, M. Optimization in forestry. *Mathematics Subject Classification*, v. 97, n. 1-2, p. 267-284, July 2003.

TAHA, H. A. Investigación de operaciones. 7. ed. Mexico: Pearson Educación, 1994. 841 p.

VALENZUELA, J.; BALCI, H; MCDONALD, T. A simulation-based optimization model for planning forest operations. In: ANNUAL COFE MEETING, FOREST ENGINEERING CHALLENGES: A GLOBAL PERSPECTIVE, 25., 2002, Portland. Proceedings... Auburn: COFE, 2002. p. 16-20.

YAMASHITA, D. S; MORABITO, R. Um algoritmo branch-and-bound para o problema de programação de projetos com custo de disponibilidade de recursos e múltiplos modos. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 14, n. 3, p. 545-555, Sept./Dec. 2007.









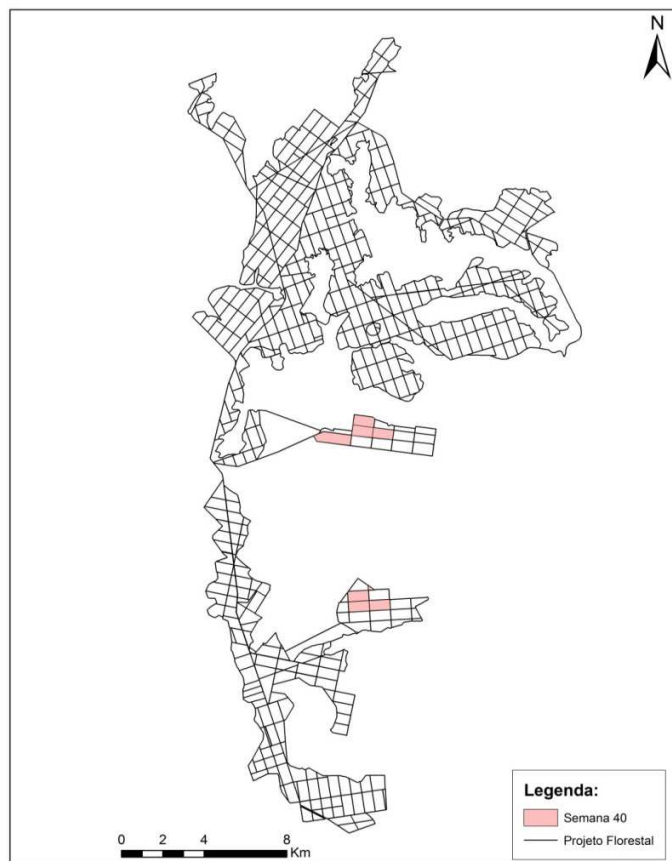


Figura 4 Distribuição semanal dos talhões a serem submetidos à atividade A, considerando a situação operacional II



Figura 5 Distribuição semanal dos talhões a serem submetidos à atividade E, considerando a situação operacional III



