

Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN: 1981-1160

editorgeral@agraria.pro.br

Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Brasil

Silva, Gilson F. da; Ghisolfi, Euclides M.; Teixeira, Alessandro F.; Cabrini, Adriana M.; Barros Jr.,  
Antonio A. de

O método das restrições na solução de um problema de planejamento florestal multiobjetivo

Revista Brasileira de Ciências Agrárias, vol. 1, núm. 1, outubro-diciembre, 2006, pp. 41-48

Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Pernambuco, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119018241007>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Gilson F. da Silva<sup>1</sup>

Euclides M. Ghisolfi<sup>2</sup>

Alessandro F. Teixeira<sup>3</sup>

Adriana M. Cabrini<sup>2</sup>

Antonio A. de Barros Jr.<sup>3</sup>

# O método das restrições na solução de um problema de planejamento florestal multiobjetivo

## RESUMO

Buscou-se, neste estudo, apresentar uma metodologia para a solução de problemas de planejamento florestal considerando-se múltiplos objetivos do planejamento. Para isso, foi considerado um problema de planejamento florestal apresentado em literatura. Este problema foi formulado de acordo com o modelo de Programação Linear clássica do tipo I, ao qual, uma vez formulado o modelo, aplicou-se o método das restrições para se buscar atender a múltiplos objetivos do planejamento florestal. Entre os objetivos considerados avaliaram-se a maximização do lucro, a minimização dos desvios de demanda ao longo do horizonte de planejamento e a maximização do uso de mão-de-obra. Ao final, após implementação do método das restrições, concluiu-se que, além de mais flexíveis e de apresentar uma gama maior de respostas, a tomada de decisão através de modelos multiobjetivos oferece um paradigma superior aos modelos tradicionais de Programação Linear, para o problema de planejamento florestal apresentado.

**Palavras-chave:** otimização, programação matemática, múltiplos objetivos

## Restriction method for the solution of a multiobjective forest planning problem

## ABSTRACT

This work had as objective to present a methodology for the solution of problems of forest planning considering objective multiples of the planning. For that, a problem of forest planning presented in literature was considered. This problem was formulated in agreement with the model of classic Linear Programming of the type I. formulated the model, the method of the restrictions was applied to assist objective multiples of the forest planning. Among the considered objectives the maximization of the profit, the minimization of the demand deviations along the planning horizon and the maximization of the labor use was evaluated. At the end, after implementation of the method of the restrictions, was concluded that, besides more flexible and of presenting a large range of answers, the making decision process through models multiobjetivos offers a superior paradigm in relationship to the traditional models of Linear Programming for the problem of forest planning presented.

**Key words:** optimization, mathematical programming, objective multiples

<sup>1</sup> Professor do Deptº de Engenharia Florestal, UFES, gfsilva2000@yahoo.com

<sup>2</sup> Estudante de Graduação de Engenharia Florestal, UFES, adrianamcabrini@yahoo.com.br

<sup>3</sup> CIENTEC – Consultoria e Desenvolvimento de Sistemas Ltda, afcientecnet; antonioabj@yahoo.com.br

## INTRODUÇÃO

O grande número de variáveis relacionadas a um processo de planejamento, em especial o florestal, requer grande habilidade e experiência do gerente florestal. Muitas vezes, quantidade excessiva das variáveis pode comprometer o êxito de um empreendimento, caso um modelo de planejamento adequado não seja utilizado. O empreendedor florestal está, na maioria dos casos, interessado em uma produção sustentável de bens que: atenda às especificações e demandas de mercado, que atenda às restrições de capital e operacional, garantido um emprego regular da mão-de-obra e apresente um custo mínimo ou um retorno máximo dentro de um horizonte de planejamento (Teixeira, 2002).

No entanto, para alcançar todos esses objetivos os manejadores florestais necessitam, além de grande habilidade e experiência, ferramentas adequadas para apoiá-los na tarefa de tomada de decisão; contudo, a escassez de tecnologias de informação ou de decisão para a gestão de recursos florestais contradiz com a complexidade dos problemas de tomada de decisão neste setor. A utilização de tecnologias de Sistemas de Informação baseados em computadores, como os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), são indispensáveis ao manejador florestal. Além de propiciar rapidez na formulação e solução de problemas, essas ferramentas propiciam a implementação dos modelos de métodos científicos para a tomada de decisão no manejo florestal (Rodrigues et al., 2000).

Entre as diversas ferramentas matemáticas atualmente aplicadas com o objetivo de otimizar o planejamento da produção florestal, as técnicas de Programação Linear (PL) constituem, sem dúvida, o instrumental analítico mais utilizado. Exemplos de uso desses modelos para este fim podem ser encontrados em Steuer & Schuler (1978), em Clutter et al. (1983), em Dykstra (1984), em Rodriguez et al. (1985), em Buongiorno & Gilles (1987), em Davis & Johnson (1986), e em Laroze (1999), dentre outros. Por outro lado, de acordo com Fatureto & Santos (1999a; 1999b) e Silva et al. (2003) e apesar da inegável importância das técnicas de PL para solução de problemas de planejamento florestal, deve-se reconhecer que esta metodologia apresenta algumas deficiências, tais como as pressuposições de que o relacionamento entre as variáveis consideradas é linear, as restrições devem ser estritamente respeitadas e as escolhas são feitas a partir de um único critério e um único objetivo.

De acordo com Rodrigues et al. (2000), apesar do grande avanço da Pesquisa Operacional (PO) na área florestal, com a evolução dos modelos de Programação Linear (PL) para modelos de Programação Inteira (PI) e Programação com Múltiplos Objetivos (PMO), e com relatos de uma infinidade de trabalhos enfocando a utilização desses modelos no suporte à tomada de decisão no planejamento florestal, a solução de problemas de grande porte tem sido ainda bastante limitada, principalmente no Brasil. A complexidade dos impasses, o volume de dados envolvidos e a carência de tecnologias adequadas são alguns fatores que dificultam a utilização desses modelos em larga escala. Exemplos de uso de técnicas de

PMO no planejamento da produção florestal no Brasil, além de em Rodrigues et al. (2000), podem ser encontrados em Teixeira (2002), Oliveira et al. (2003) e Pereira (2004).

O presente trabalho teve como objetivo principal apresentar uma metodologia com vistas à solução de problemas de planejamento florestal considerando-se múltiplos objetivos do planejamento.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho consistiu na formulação e solução de um problema envolvendo planejamento florestal por meio de metodologias de otimização, sob objetivos múltiplos. Para se alcançar os objetivos propostos, de mostrar a potencialidade de aplicação de metodologias de otimização na solução de problemas florestais multiobjetivos, tomou-se como base o problema proposto por Silva (2001).

### Descrição do problema de planejamento florestal

Como já mencionado, utilizou-se, neste trabalho, o problema proposto por Silva (2001) que trata de uma empresa florestal que deseja elaborar um plano de manejo para uma floresta equiânea para os próximos 8 anos, com os seguintes objetivos:

- maximizar o retorno econômico
- minimizar os desvios no atendimento da demanda esperada pela fábrica
- maximizar o uso de mão-de-obra pela empresa florestal.

A caracterização do empreendimento florestal em questão está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Descrição dos povoamentos em termos de área e idade atual

**Table 1.** Description of the stands in terms of area and current age

Povoamentos	Idade Atual (ano)	Área (ha)
1	0	50,00
2	1	80,00
3	2	50,00
4	3	50,00
5	4	90,00
6	5	50,00
7	6	50,00
8	7	70,00

Conforme já mencionado, o horizonte de planejamento é de 8 anos, pretendendo-se obter, ao final uma floresta regulada.

Na Tabela 2 se acham, disponíveis as informações de inventário florestal e valores comerciais e não comerciais da madeira em pé, necessários para implementação do estudo.

São fornecidas ainda, as seguintes informações:

- Sítio homogêneo
- Possíveis atividades incluem: corte seguido de imediata regeneração via plantio
- Operações de corte ocorrem uma vez a cada ano, no início do ano
- A demanda anual do mercado por madeira é de 10.000,00 m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>

**Tabela 2.** Valores e volumes para a floresta, assumindo-se que todas as áreas possuem a mesma classe de produtividade**Table 2.** Values and volumes to the forest, assuming that all areas possess the same productivity class

Produto (madeira)	Idade (anos)	Produção (m³ ha⁻¹)	Valor (\$ m⁻³)
Classe não comercial	1	50,25	10*
	2	70,35	10
	3	95,74	10
	4	130,67	10
	5	179,10	20
Classe comercial	6	235,02	20
	7	285,37	20
	8	300,00	20

\* valor fornecido para classe não comercial para fins de avaliação do estoque final

- São necessários uma unidade de mão-de-obra por hectare para alternativas de manejo com um corte e duas unidades por hectare para alternativas com dois cortes. A empresa dispõe de 630 unidades de mão-de-obra para todo o horizonte de planejamento.

Ressalta-se que o exemplo aqui apresentado se trata de uma situação hipotética, sem maiores preocupações com questões de modelagem mas com a realidade dos coeficientes técnicos, uma vez que o foco do trabalho se dirige para questões relativas à programação por múltiplos objetivos.

### Formulação pelo modelo clássico de programação linear

Inicialmente, o problema foi formulado como um problema de Programação Linear clássico. Deste modo, foi empregado o modelo I proposto originalmente por Kidd et al. (1966) apud Dykstra (1984), recebendo esta denominação por Johnson & Sheurman (1977). Nesta formulação, a variável de decisão  $X_{ij}$  representa a fração da unidade  $i$ , que deverá ser assinalada à prescrição  $j$ . Esta formulação se baseia no fato de que a floresta é subdividida em classes homogêneas de idade, sendo posteriormente prescrito um elenco predeterminado de alternativas de manejo para cada classe. As prescrições representam seqüências preestabelecidas de ações que ocorrerão ao longo do período de transição (Ribeiro, 1996). As prescrições podem se referir, por exemplo, às idades de colheita de uma área, seguidas de regeneração. Uma vez que uma fração de área seja assinalada a determinada prescrição de manejo, ela permanecerá sobre tal prescrição durante todo o horizonte de planejamento. O horizonte de planejamento, por sua vez, é subdividido em períodos e as ações ocorrem no seu início (Ribeiro, 1996).

Considerando-se a abordagem via modelo I, como já mencionado, as prescrições de manejo foram sugeridas para o problema em questão (Tabela 3). Para a determinação das prescrições, consideram-se, como idades de corte, mínima e máxima, cinco e oito anos, respectivamente.

### Função objetivo

Inicialmente, considerou-se objetivo principal do empreendedor a maximização do valor presente líquido global da floresta, definindo-se a seguinte função objetivo:

**Tabela 3.** Prescrições viáveis de manejo para um horizonte de planejamento de oito anos**Table 3.** Viable prescriptions of management for a horizon of eight years planning

Prescrição de Manejo	Idade Atual	Rotações em anos	Horizonte de Planejamento								Idade Final
			0	1	2	3	4	5	6	7	
X <sub>11</sub>	0	5									3
X <sub>12</sub>	0	6									2
X <sub>13</sub>	0	7									1
X <sub>21</sub>	1	5									4
X <sub>22</sub>	1	6									3
X <sub>23</sub>	1	7									2
X <sub>24</sub>	1	8									1
X <sub>31</sub>	2	5									5
X <sub>32</sub>	2	6									4
X <sub>33</sub>	2	7									3
X <sub>34</sub>	2	8									2
X <sub>41</sub>	3	5-5									1
X <sub>42</sub>	3	6									5
X <sub>43</sub>	3	7									4
X <sub>44</sub>	3	8									3
X <sub>51</sub>	4	5-5									2
X <sub>52</sub>	4	5-6									1
X <sub>53</sub>	4	6-5									1
X <sub>54</sub>	4	7									5
X <sub>55</sub>	4	8									4
X <sub>61</sub>	5	5-5									3
X <sub>62</sub>	5	5-6									2
X <sub>63</sub>	5	5-7									1
X <sub>64</sub>	5	6-5									2
X <sub>65</sub>	5	6-6									1
X <sub>66</sub>	5	7-5									1
X <sub>67</sub>	5	8									5
X <sub>71</sub>	6	6-5									3
X <sub>72</sub>	6	6-6									2
X <sub>73</sub>	6	6-7									1
X <sub>74</sub>	6	7-5									2
X <sub>75</sub>	6	7-6									1
X <sub>76</sub>	6	8-5									1
X <sub>81</sub>	7	7-5									3
X <sub>82</sub>	7	7-6									2
X <sub>83</sub>	7	7-7									1
X <sub>84</sub>	7	8-5									2
X <sub>85</sub>	7	8-6									1

■ Corte  
□ Não Corte

$$\text{Max. } Z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C_{ij} X_{ij}$$

em que:

$C_{ij}$  - é o valor presente líquido de cada hectare do povoamento  $i$ , manejado sob a alternativa de manejo  $j$

$X_{ij}$  - fração de área (ha) do povoamento  $i$  assinalada alternativa de manejo  $j$

$M$  - número total de talhões

$N$  - número total de alternativas de manejo do  $i$ -ésimo povoamento.

Para obtenção do valor presente líquido da produção (VPL), empregou-se a metodologia utilizada por Rodrigues (1998). Para o cálculo do VPL foi considerada uma taxa de

desconto de 7% a.a.; assim, a função objetivo assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{MAX } Z = & 1021,48 X_{11} + 1467,77 X_{12} + 1790,92 X_{13} + 1337,08 \\ & X_{21} + 1762,89 X_{22} + 2082,78 X_{23} + 1917,14 X_{24} + 1748,44 \\ & X_{31} + 2130,39 X_{32} + 2420,94 X_{33} + 2217,83 X_{34} + 3517,20 \\ & X_{41} + 2597,27 X_{42} + 2834,51 X_{43} + 2565,45 X_{44} + 3873,90 \\ & X_{51} + 4315,17 X_{52} + 4425,45 X_{53} + 3350,88 X_{54} + 2989,13 \\ & X_{55} + 4281,44 X_{61} + 4727,73 X_{62} + 5050,88 X_{63} + 4845,73 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & X_{64} + 5287,00 X_{65} + 5231,60 X_{66} + 3516,13 X_{67} + 5321,30 \\ & X_{71} + 5767,59 X_{72} + 6090,73 X_{73} + 5708,31 X_{74} + 6149,58 \\ & X_{75} + 5408,62 X_{76} + 6244,26 X_{81} + 6690,55 X_{82} + 7013,69 X_{83} \\ & + 5897,72 X_{84} + 6339,00 X_{85} \end{aligned}$$

em que, a título de exemplo, R\$ 1.021,48 correspondem ao lucro que se teria (VPL) caso um hectare da unidade de manejo 1 fosse cortado seguindo a opção de manejo 1 (corte aos cinco anos de idade).

#### Restrição de área disponível para colheita

Esta é a restrição que determina a disponibilidade total de área de cada projeto florestal e é imprescindível, uma vez que impõe que a soma das áreas de um mesmo projeto submetido a diferentes alternativas de corte seja igual à da área total de cada projeto, sendo:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij} = A_i \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \text{ e } 8)$$

$A_i$  = área do  $i$ -ésima classe de idade no início do horizonte de planejamento.

Assim, a restrição pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{12} + X_{13} &< 50 \\ X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} &< 80 \\ X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} &< 50 \\ X_{41} + X_{42} + X_{43} + X_{44} &< 50 \\ X_{51} + X_{52} + X_{53} + X_{54} + X_{55} &< 90 \\ X_{61} + X_{62} + X_{63} + X_{64} + X_{65} + X_{66} + X_{67} &< 50 \\ X_{71} + X_{72} + X_{73} + X_{74} + X_{75} + X_{76} &< 50 \\ X_{81} + X_{82} + X_{83} + X_{84} + X_{85} &< 70 \end{aligned}$$

#### Imposição de cotas ou produções anuais

Esta, talvez, seja a restrição de maior importância, uma vez que a principal meta do empreendedor é a produção periódica de volume de madeira de modo a atender a uma demanda preestabelecida por uma fábrica ou atender a uma demanda contratual do mercado vigente.

Considerando-se  $V_{HK}$  o volume total removido no período  $K$ :

$$V_{HK} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ijk} X_{ij} \quad \{K = 0, 1, \dots, H-2\}$$

em que:

$V_{ijk}$  - volume ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) produzido pela  $i$ -ésima classe de idade de sujeita a  $j$ -ésima alternativa de manejo no início do período  $K$

$V_{HK}$  - volume total ( $\text{m}^3$ ) removido no período  $K$ , representando a demanda a ser atendida no período  $k$

Para o problema proposto, a demanda do mercado por madeira é de  $10.000,00 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ .

Estas restrições podem ser assim representadas:

$$\begin{aligned} \text{VH0 : } & 179,10 X_{61} + 179,10 X_{62} + 179,10 X_{63} + 235,02 X_{71} + 235,02 \\ & X_{72} + 235,02 X_{73} + 285,37 X_{81} + 285,37 X_{82} + 285,37 X_{83} \\ & > 10.000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VH1 : } & 179,10 X_{51} + 179,10 X_{52} + 235,02 X_{64} + 235,02 X_{65} \\ & + 285,37 X_{74} + 285,37 X_{75} + 300,00 X_{84} + 300,00 X_{85} \\ & > 10.000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VH2 : } & 179,10 X_{41} + 235,02 X_{53} + 285,37 X_{66} + 300,00 X_{76} \\ & > 10.000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VH3 : } & 179,10 X_{31} + 235,02 X_{42} + 285,37 X_{54} + 300,00 X_{67} \\ & > 10.000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VH4 : } & 179,10 X_{21} + 235,02 X_{32} + 285,37 X_{43} + 300,00 X_{55} \\ & > 10.000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VH5 : } & 179,10 X_{11} + 235,02 X_{22} + 285,37 X_{33} + 300,00 X_{44} + \\ & 179,10 X_{61} + 179,10 X_{71} + 179,10 X_{81} > 10.000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VH6 : } & 235,02 X_{12} + 285,37 X_{23} + 300,00 X_{34} + 179,10 X_{51} + \\ & 235,02 X_{62} + 179,10 X_{64} + 235,02 X_{72} + 179,10 X_{74} + 235,02 \\ & X_{82} + 179,10 X_{84} > 10.000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VH7 : } & 300,00 X_{13} + 300,00 X_{24} + 179,10 X_{41} + 235,02 X_{52} + \\ & 179,10 X_{53} + 285,37 X_{63} + 235,02 X_{65} + 179,10 X_{66} + 285,37 \\ & X_{73} + 235,02 X_{75} + 179,10 X_{76} + 285,37 X_{83} + 235,02 X_{85} \\ & > 10.000 \end{aligned}$$

#### Exigência de uma estrutura regulada

Uma das opções mais comumente usadas para se obter uma floresta regulada ao final do horizonte de planejamento, consiste na inclusão de restrições que imponham uma distribuição adequada de classes de idades para o inventário final; só assim será possível se ter uma floresta regulada ao fim de um horizonte de planejamento finito. Esta formulação é feita da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ijk} = \frac{S}{NC} \quad \{K = 1, 2, \dots, NC\}$$

em que:

$X_{ijk}$  - área do  $i$ -ésimo povoamento manejado sobre a  $j$ -ésima alternativa de manejo, cujas áreas terão  $k$  períodos

(anos) de idade ao final do horizonte de planejamento

$NC$  - número de classe de idade para a floresta regulada

$S$  - área total da floresta (490 ha)

No problema exemplo, a rotação regulatória é igual à idade de rotação econômica (7 anos). Ainda neste caso, em que o intervalo de corte é igual a 1 ano, tem-se  $NC = 7$ . Assim,  $S/NC = 490/7 = 70$  ha.

Essas restrições podem ser assim representadas:

$$\text{REG1 : } X_{51} + X_{52} + X_{64} + X_{65} + X_{74} + X_{75} + X_{84} + X_{85} = 70$$

$$\text{REG2 : } X_{41} + X_{53} + X_{66} + X_{76} = 70$$

$$\begin{aligned}
\text{REG3 : } & X_{31} + X_{42} + X_{54} + X_{67} = 70 \\
\text{REG4 : } & X_{21} + X_{32} + X_{43} + X_{55} = 70 \\
\text{REG5 : } & X_{11} + X_{22} + X_{33} + X_{44} + X_{61} + X_{71} + X_{81} = 70 \\
\text{REG6 : } & X_{12} + X_{23} + X_{34} + X_{51} + X_{62} + X_{64} + X_{72} + X_{74} + X_{82} \\
& + X_{84} = 70 \\
\text{REG7 : } & X_{13} + X_{24} + X_{41} + X_{52} + X_{53} + X_{63} + X_{65} + X_{66} + X_{73} \\
& + X_{75} + X_{76} + X_{83} + X_{85} = 70
\end{aligned}$$

### Restrição de mão-de-obra

Considerando-se os gastos de mão-de-obra de uma e duas unidades para alternativas com um corte e dois cortes, respectivamente, e uma disponibilidade total de mão-de-obra durante todo o horizonte de planejamento de 630 unidades, a restrição de mão-de-obra pode ser expressa como se segue:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N M_{ij} X_{ij} \leq MO$$

em que:

- $M_{ij}$  - mão-de-obra (un ha<sup>-1</sup>) utilizada pela j-ésima alternativa de manejo no i-ésima unidade de produção
- MO - mão-de-obra total disponível durante todo o período de planejamento (un.)

O desenvolvimento da expressão acima resulta em:

$$\begin{aligned}
& X_{11} + X_{12} + X_{13} + 2 X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{31} + \\
& X_{32} + X_{33} + X_{34} + 2 X_{41} + X_{42} + X_{43} + X_{44} + 2 X_{51} + 2 X_{52} \\
& + 2 X_{53} + X_{54} + X_{55} + 2 X_{61} + 2 X_{62} + 2 X_{63} + 2 X_{64} + 2 X_{65} \\
& + 2 X_{66} + 1 X_{67} + 2 X_{71} + 2 X_{72} + 2 X_{73} + 2 X_{74} + 2 X_{75} + 2 \\
& X_{76} + 2 X_{81} + 2 X_{82} + 2 X_{83} + 2 X_{84} + 2 X_{85} < 630
\end{aligned}$$

### Otimização sob múltiplos critérios

Tendo em vista o problema formulado, o planejador florestal poderia deparar-se com os seguintes objetivos:

- Maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do investimento
- Minimizar os desvios de produção acima da demanda exigida pela fábrica
- Maximizar o uso de mão-de-obra como forma de ganho social para a empresa.

Deve-se observar que o objetivo de maximizar o VPL está em conflito com os objetivos de regularizar a demanda e de aumentar o uso de mão-de-obra.

Como já foi proposto, este problema pode ser resolvido como um Problema de Programação Linear considerando-se o objetivo único de maximizar o VPL e incluindo os demais objetivos no modelo, como restrições, entretanto, maximizar apenas um objetivo, tratando os demais objetivos como constantes, pode levar a resultados insatisfatórios.

Para a realização deste trabalho foi utilizado o software Lingo, versão 3. Como o problema proposto é de natureza multiobjetivo e este software apresenta um solver apenas para problemas de objetivo único, utilizou-se o artifício de se transformar uma das funções-objetivo do problema em restrição e parametrizar valores para esta restrição, de forma a se obter soluções ao longo da fronteira Pareto-ótima (Método da Restrição), metodologia semelhante à empregada por Teixeira (2002).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que o objetivo deste trabalho foi a proposição e solução de um modelo multiobjetivo, os objetivos tratados foram de maximização dos lucros, minimização do desvio da demanda e maximização do uso de mão-de-obra.

Em modelos de planejamento florestal uniobjetivo, tem-se como meta a maximização ou minimização de apenas uma situação, sem possibilidade de que outros objetivos sejam considerados, diminuindo o número de cenários possíveis a serem avaliados pelo tomador de decisão (TD). Este fato dá, ao TD, uma flexibilidade menor para escolha de um plano ótimo de ação. Por outro lado, os modelos multiobjetivos apresentam diversos cenários no auxílio ao planejamento florestal, possibilitando ao TD escolher o plano ótimo de sua preferência.

Assim, o problema proposto foi resolvido pelo Método da Restrição, encontrando-se os cenários apresentados na Tabela 4. Todas as soluções apresentadas nesta Tabela foram Soluções Ótimas de Pareto, pois foram melhores para um objetivo e piores em relação aos demais, ou seja, nenhuma das oito soluções apresentadas apresentou, ao mesmo tempo, o maior lucro, o menor desvio de demanda e o maior número de mão-de-obra empregada. Observa-se, por exemplo, que aquelas soluções em que o lucro é maior, o desvio de demanda é elevado. Outro exemplo é o caso em que o desvio de demanda é baixo mas o uso de mão-de-obra também é baixo, ou seja, em nenhum cenário todos os objetivos são alcançados de forma ótima com uma única resposta. Neste caso, a decisão final é tomada em função da preferência do TD em relação aos objetivos considerados, no caso deste trabalho, especialmente lucro e desvio de demanda. Como exemplo, caso o TD tenha preferência por lucro, ele deverá escolher, na Tabela 4, a solução de número 1.

**Tabela 4.** Valor da função-objetivo para as soluções ótimas de Pareto representando cada cenário encontrado no problema do modelo proposto

**Table 4.** Value of the function objective for the best solutions of Pareto representing each scene found in the problem of the proposed model

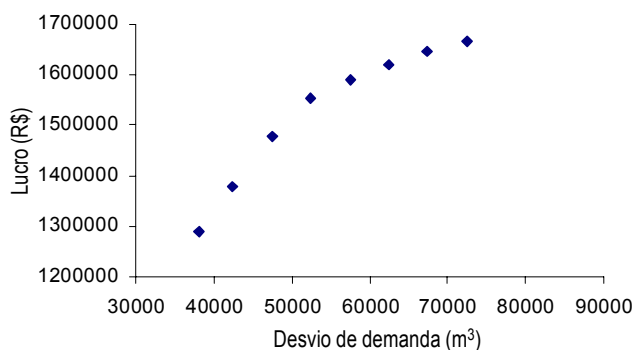
Soluções Geradas	Desvio de Demanda (m³)	Mão-de-Obra. (un.)	Lucro (R\$)
1	72448,61	630,00	1668509
2	67448,61	630,00	1648464
3	62448,61	630,00	1621808
4	57448,61	617,00	1592042
5	52448,61	565,58	1552898
6	47448,61	559,77	1476796
7	42448,61	537,98	1379141
8	38070,00	526,81	1290152

Além de permitir avaliar o desempenho do modelo em relação a mais de um objetivo, dando a oportunidade ao TD de exercer suas preferências, o modelo multiobjetivo, ao proporcionar vários cenários, permite também avaliar as soluções alternativas no momento em se faz a escolha por uma solução de preferência. Isto se constitui em uma grande vantagem em relação aos modelos de Programação Linear clássica, uma vez que, quando se escolhe, entre vários cenários, um a



ser seguido, tem-se a dimensão do que se poderá perder ao abrir mão das demais alternativas, o que torna a decisão mais segura. Para ilustrar esta afirmação, observando-se a Tabela 4, caso o TD prefira a solução de número 8, ele saberá que ao fazer esta escolha, estará reduzindo o uso da mão-de-obra de 630 (número de unidades que se poderia empregar caso se escolhesse entre as soluções 1, 2 e 3) para aproximadamente 527 unidades. Este tipo de informação permitirá à empresa um planejamento estratégico mais seguro das ações futuras a serem tomadas.

Tem-se, na Figura 1, a fronteira ótima para os dois objetivos considerados, ou seja, maximização do lucro e minimização dos desvios de demanda. Esta figura mostra claramente que o objetivo de minimizar os desvios de demanda é conflitante com o de maximizar o lucro; isto acontece porque, a medida em que o desvio de demanda aumenta, o lucro também aumenta, sendo que o contrário seria o ideal. Assim, corroborando com o resultado encontrado na Tabela 4, soluções em que o lucro é maior não alcançarão ao mesmo tempo o objetivo de minimizar os desvios de demanda, e vice-versa sendo, portanto, soluções ótimas de Pareto. A Figura 1, além de proporcionar uma outra visão dos resultados apresentados na Tabela 4, permite definir com clareza a chamada fronteira ótima. Esta fronteira define os valores ótimos possíveis para um objetivo, dado aos níveis de outro objetivo considerado. Avaliando-se, como exemplo, o primeiro ponto da figura, observa-se que para um desvio de demanda de aproximadamente 40.000 m<sup>3</sup>, o lucro máximo que se poderá alcançar será de aproximadamente de R\$1.300.000,00 e assim, analogamente, pode-se interpretar ao longo da fronteira ótima apresentada na Figura 1.



**Figura 1.** Fronteira ótima encontrada para o problema do modelo proposto, desvio de demanda em função do lucro

**Figure 1.** Best solution border found for the problem of the proposed model, deviation of demand in function of the profit

Na Tabela 5 se apresenta o plano de ação ou plano de manejo da floresta para cada solução ótima de Pareto. Se o tomador de decisão (TD), por exemplo, optar por adotar o cenário em que o desvio de demanda será de 38070,00 m<sup>3</sup> (solução 8 da Tabela 4), ele deverá seguir as prescrições encontradas na coluna referente a este desvio, ou seja, ele adotará as prescrições: X<sub>22</sub>; X<sub>32</sub>; X<sub>42</sub>; X<sub>51</sub>; X<sub>53</sub>; X<sub>55</sub>; X<sub>64</sub>; X<sub>66</sub>; X<sub>67</sub>; X<sub>71</sub>; X<sub>76</sub> e X<sub>81</sub>, em que X<sub>22</sub> representa a área (em hecta-

res) a ser cortada na unidade de manejo 2 aos 5 anos de idade, e assim sucessivamente. A Tabela 2 permite compreender melhor este tipo de resposta. Evidencia-se também que, dependendo da decisão escolhida pelo TD, as estratégias de corte poderão variar, isto é, as áreas a serem cortadas, bem como as idades de corte, poderão ser completamente diferentes. Como exemplo, a solução apresentada para o desvio de demanda de 72448,61 m<sup>3</sup> foi (Tabela 5): X<sub>13</sub>; X<sub>21</sub>; X<sub>22</sub>; X<sub>31</sub>; X<sub>32</sub>; X<sub>43</sub>; X<sub>53</sub>; X<sub>54</sub>; X<sub>66</sub>; X<sub>74</sub>; X<sub>81</sub> e X<sub>84</sub>, bem diferente da anterior, mostrando que as estratégias de corte mudam de acordo com os objetivos considerados. A vantagem do método multiobjetivo aqui apresentado em relação ao procedimento clássico de Programação Linear é permitir ao TD visualizar as mudanças de estratégias em relação aos objetivos, podendo decidir com maior segurança.

É muito importante alertar que, assim como em modelos de Programação Linear clássicos, neste tipo de modelo as soluções podem ser muito sensíveis aos coeficientes da função objetivo e dos tecnológicos, ou seja, mudanças nos lucros de cada alternativa de manejo bem como mudanças nos volumes previstos para cada unidade de produção podem alterar completamente o plano ótimo a ser seguido. Tal fato é amplamente analisado por Silva (2001). Para ilustrar esta afirmação, considere que o lucro associado à variável X<sub>11</sub> (cortar a unidade de manejo 1 aos cinco anos de idade) é igual a R\$ 1021,48 (definido no item função objetivo). Caso o verdadeiro lucro seja maior ou menor que este valor previsto, não se pode mais garantir que o plano sugerido pela solução do modelo será ótimo. O mesmo ocorre para variações ocorridas nos coeficientes tecnológicos, como o volume, por exemplo. Avaliando o impacto da prognose da produção, no desempenho de modelos de otimização, Silva (2001) verificou que diferenças nos volumes considerados nos modelos, mesmo que não muito grandes, podem levar a planos ótimos completamente diferentes. Este fato reforça a necessidade dos usuários deste tipo de modelo de trabalharem com dados os mais confiáveis possíveis, especialmente os dados econômicos (preço de insumos, preço da madeira etc) e os dados da prognose da produção.

É importante que ressaltar que, no caso dos modelos de planejamento aqui tratados, o plano ótimo representa, basicamente, para o TD, informações de onde, como e quando cortar a floresta de modo a se alcançar os objetivos propostos da melhor forma possível. No caso deste trabalho, diferentemente dos modelos de PL clássicos, os objetivos são múltiplos e, em alguns casos, conflitantes, o que requer maior esforço de análise do TD e métodos apropriados como o aqui apresentado (método das restrições).

O uso de modelos multiobjetivos no Brasil ainda é muito incipiente. A maioria das empresas florestais brasileiras usa métodos de Programação Linear (PL) clássica para solução de seus problemas de planejamento. Por outro, muitos são os objetivos a serem considerados em problemas de planejamento florestal, cabendo citar problemas legais, econômicos, ambientais, sociais e técnicos. Mais recentemente, pode-se encontrar alguns trabalhos empregando metodologias multiobjetivo para solução de problemas de planejamento flores-

**Tabela 5.** Prescrições viáveis de manejo para cada cenário encontrado em função do desvio de demanda**Table 5.** Viable prepositions of management for each scene found in function of deviation of demand

Variável	Desvio de Demanda (m³)							
	38070,00	42448,61	47448,61	52448,61	57448,61	62448,61	67448,61	72448,61
X <sub>11</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>12</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	26,370,455	25,952,446	0,00000
X <sub>13</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	24,047,554	50,000,000
X <sub>21</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	23,501,451	16,814,774	5,000,000	5,000,000
X <sub>22</sub>	33,19340	22,02480	0,233559	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	20,000,000
X <sub>23</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>24</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>31</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	5,584,087	10,000,000	10,000,000	10,000,000	30,000,000
X <sub>32</sub>	50,00000	50,00000	50,000,000	40,000,000	40,000,000	40,000,000	40,000,000	20,000,000
X <sub>33</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>34</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>41</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>42</sub>	50,00000	50,00000	50,000,000	20,000,000	20,000,000	20,000,000	20,000,000	0,00000
X <sub>43</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	30,000,000	30,000,000	30,000,000	30,000,000	50,000,000
X <sub>44</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>51</sub>	69,51074	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>52</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>53</sub>	0,48926	69,51074	70,000,000	40,000,000	40,000,000	40,000,000	40,000,000	20,000,000
X <sub>54</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	70,000,000
X <sub>55</sub>	20,00000	20,00000	20,000,000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>61</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>62</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>63</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>64</sub>	0,48926	30,00000	30,000,000	20,000,000	20,000,000	20,000,000	20,000,000	0,00000
X <sub>65</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>66</sub>	29,51074	0,00000	0,00000	30,000,000	30,000,000	30,000,000	30,000,000	50,000,000
X <sub>67</sub>	20,00000	20,00000	20,000,000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>71</sub>	10,00000	10,00000	10,000,000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>72</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>73</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>74</sub>	0,00000	40,00000	40,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000	50,000,000
X <sub>75</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>76</sub>	40,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>81</sub>	26,80660	37,97520	59,766,441	70,000,000	70,000,000	70,000,000	70,000,000	50,000,000
X <sub>82</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>83</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
X <sub>84</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	20,000,000
X <sub>85</sub>	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

tal, como os trabalhos de Teixeira (2002) e Pereira (2004); entretanto, estes são ainda em número reduzido e tratam de um problema muito complexo que precisa ser mais bem avaliado. Assim, o esforço despendido neste trabalho foi no sentido de ampliar as pesquisas de modelos multiobjetivo de modo a evidenciar a superioridade desses métodos em relação aos métodos clássicos de Programação Linear; porém novas pesquisas carecem de serem feitas explorando outras possibilidades como o uso de variáveis inteiras, métodos heurísticos e outros métodos multiobjetivos, como Programação por Metas, Método Stem, entre outros.

## CONCLUSÕES

O uso de otimização através de modelos multiobjetivos mostrou-se viável para problemas de planejamento florestal.

A maior flexibilidade proporcionada pelos cenários apresentados permitiu uma análise mais detalhada do problema,

além de gerar soluções alternativas que podem então ser escolhidas e implementadas, respeitando as preferências do tomador de decisão.

A tomada de decisão através de modelos multiobjetivos oferece um paradigma superior aos modelos tradicionais de Programação Linear, para o problema de planejamento florestal apresentado.

## LITERATURA CITADA

- Buongiorno, J.; Gilles, J.K. Forest management and economics - a primer in quantitative methods. Berkeley; 1987. 285p.
- Clutter, J.C.; Fortson, J.C.; Piennar, L.V.; Brister, G.H.; Bailey, R.L. Timber management: a quantitative approach. 3 ed. New York: John Wiley, 1983. 333p.
- Davis, L.S.; Johnson, K.N. Forest management. 3.ed. New York: Mc Graw - Hill Book Company, 1987. 790p.



- Dykstra, D.P., Mathematical programming for natural resource management. New York: McGraw-Hill, 1984. 318p.
- Fatureto, C. R. C. ; Santos, H. N. . Tomada de decisão sob critérios múltiplos: metodologias e oportunidades de aplicação no Agribusiness - Parte I. Revista Brasileira de Agroinformática, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 13-27, 1999a.
- Fatureto, C. R. C. ; Santos, H. N. . Tomada de decisão sob critérios múltiplos: metodologias e oportunidades de aplicação no Agribusiness - Parte II. Revista Brasileira de Agroinformática, Viçosa, v. 2, n. 2, p. 83-94, 1999b.
- Johnson, K. N., Scheurman, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - discussion and synthesis. Forest Science, Washington, v.18, n.1, p.1-31, 1977.
- Laroze, A. J. A linear programming, tabu search method for solving forest-level bucking optimization problems. Forest Science, Washington, v. 45, n. 1, p. 108-116, 1999.
- Oliveira, F. de, Volpi, N.M.P., Sanquetta, C.R. Goal programming in a planning problem. Applied Mathematics and Computation, New York, v.140, n.1 , p.165-178, 2003.
- Pereira, G. W. Aplicação da técnica de reconhecimento simulado em problemas de planejamento florestal multiobjetivo. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 74p. Dissertação Mestrado
- Ribeiro, C.A.A.S. Pesquisa operacional aplicada ao manejo florestal. Viçosa: UFV, Departamento de Engenharia Florestal, 1996. 107p.
- Rodrigues, F.L.; Leite, H.G.; Alves, J.M. *Sysflor* - um sistema de suporte à decisão para o planejamento florestal. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 32., 2000, Viçosa. Anais... Viçosa: UFV, 2000. p. 974-995.
- Rodriguez, L.C.E.; Lima, A.B.N.P. M. A utilização da programação linear na determinação de uma estratégia ótima de reforma de um talhão florestal. IPEF, Piracicaba-SP, n.31, p.47-53, 1985.
- Silva, G.F. Problemas no uso de modelos de programação matemática e simulação na regulação florestal. Viçosa: UFV, 2001. 89p. Tese Doutorado
- Silva, G.F., Leite, H.G.; Silva, M.L. da, Rodrigues, F.L., Santos, H.do N. Problemas com o uso de programação linear com posterior arredondamento da solução ótima, em regulação florestal. Revista Árvore, Viçosa, v.27, n.5, p.677-688, 2003.
- Steuer, R.E., Schuler, A.T. An interactive multiple-objective linear programming approach to a problem in forest management. Operations Research, v.26, n.2, p.254-269, 1978.
- Teixeira, A. F. Aplicação de algoritmos evolucionários na solução de problemas de planejamento florestal multiobjetivo. Belo Horizonte: UFMG, 2002. 70 p. Dissertação Mestrado