

MÉTODO HÍBRIDO SIMPLEX – SIMULATED ANNEALING NA REGULAÇÃO FLORESTAL ENVOLVENDO VARIÁVEIS BINÁRIAS

Kalill José Viana da Páscoa
kalillpascoa@gmail.com

Lucas Rezende Gomide
lucasgomide@dcf.ufla.br

Igor Akio Kague Hespanhol
igor.hespanhol@gmail.com

Juliana Carneiro Gonçalves
jujacarneiro@gmail.com

Paulo Henrique da Silva
phdsflorestal@hotmail.com

Marcos Antônio Isaac Júnior
maisaacjr@yahoo.com.br

Universidade Federal de Lavras - UFLA
Campus universitário – Lavras/MG – Cep.:37.200-000

RESUMO

Neste trabalho foi utilizado um método híbrido para a resolução de problemas de regulação florestal envolvendo variáveis inteiras. O método híbrido é a união da programação linear (PL) com a metaheurística *simulated annealing* (SA). A função objetivo da PL foi a maximização do valor presente líquido (VPL). A solução obtida pela PL apresentou mais de uma alternativa de manejo para um único talhão, todavia produziu uma solução ótima inicial. Essa solução ótima gerada pela PL foi o *input* da metaheurística SA, que gerou um resultado próximo da solução encontrada pela PLI e superior ao resultado encontrado pela metaheurística SA sem o uso da solução inicial. O método híbrido apresentou desvio de 1,30%, em média, em relação ao VPL gerado pela PLI. Os resultados obtidos pelo método híbrido comprovam a possibilidade de obtenção de soluções factíveis em um curto tempo de processamento.

PALAVRAS CHAVE. Inteligência artificial, Simplex, Manejo Florestal.
Área principal (AG&MA - PO na Agricultura e Meio Ambiente)

ABSTRACT

In this paper was utilized a hybrid method for solving problems of forest regulation involving integer variables. The hybrid method is a union of linear programming (LP) with metaheuristic simulated annealing (SA). The objective function of the LP was the maximization of net present value (NPV). The solution obtained by the PL had more than one management alternative for a single plot, but produced a good initial solution. This optimal solution generated by the PL was the input to metaheuristic SA, which generated a result similar to the solution found by the ILP and higher than the results found by the metaheuristic SA without the use of the initial solution. The hybrid method presented deviation of 1.30% on average compared to the NPV generated by ILP. The results obtained by the hybrid method confirm a possibility of obtaining feasible solutions in a short processing time.

KEYWORDS. Artificial intelligence, Simplex, Forest Management.
Main area (AG & MA - PO in Agriculture and Environment)

1 Introdução

As plantações de eucalipto cresceram de maneira significativa ao longo dos últimos anos no país. Em 2011 a área ocupada por plantios florestais alcançou 4.873.952 hectares, enquanto que em 2005 eram apenas 3.514.119 hectares plantados, o que corresponde a um acréscimo de 27,9% no período entre 2005-2011, ou seja, em média um crescimento de 3,0% ao ano (ABRAF, 2012). O principal fator que alavancou esse crescimento foi o estabelecimento de novos plantios com o objetivo de atender à demanda futura dos projetos industriais do segmento de Papel e Celulose e de Siderurgia a Carvão Vegetal.

Mediante a esse cenário, o manejo florestal é fundamental para a obtenção da máxima produtividade e controle do volume de madeira gerado por essas florestas. Para isso, um correto planejamento das atividades a serem executadas deve ser realizado, possibilitando a manutenção de uma produção constante e contínua (SCHNEIDER, 1993).

O planejamento florestal pode ser definido como a organização das diversas atividades a serem executadas ao longo do tempo em um plantio florestal, com a finalidade de atender os objetivos estabelecidos pelo empreendimento (BASKENT e KELES, 2005). Ele se baseia no monitoramento do crescimento da floresta e nas informações sobre os recursos disponíveis para serem manejados. De posse dessas informações é possível realizar simulações para definir a taxa anual de colheita e as estratégias de intervenção a serem efetuadas nas florestas.

Para essa definição, diversas ferramentas foram desenvolvidas, ligando, a Programação Matemática a Pesquisa Operacional (PO). Os problemas normalmente tratados pela PO na área florestal são de natureza complexa, e apresentam vários aspectos envolvidos. Assim, sua aplicação é de grande valia no processo de análise, tomada de decisão e geração de ações (BOYLAND et al., 2005), pois permite que várias informações possam ser analisadas conjuntamente, como aspectos do mercado, prognose do crescimento e da produção da floresta e critérios de avaliação econômica, culminando assim na construção de um cronograma que otimize a produção florestal (MELO et al., 2011).

Para isso a PO faz uso de modelos matemáticos que visam a otimização de funções objetivo, sujeitas a um conjunto de restrições. A representação simplificada de um problema prático por meio de um modelo matemático permite que sobre ele se aplique técnicas e métodos, que facilitem a obtenção de uma solução viável. Johnson e Scheurmann (1977) afirmam que a programação linear (PL) é um dos métodos mais utilizados para resolver problemas de planejamento florestal, tendo como objetivo encontrar a combinação ótima entre as alternativas de manejo possíveis de serem aplicadas a uma floresta.

As heurísticas e metaheurísticas, também podem ser aplicadas para resolver problemas de planejamento florestal, mas ao contrário da PL elas utilizam algoritmos aproximados, ou seja, encontram uma solução próxima do ótimo, como é o caso da metaheurística *Simulated Annealing* (SA). Essas técnicas são muito aplicadas quando o uso da PL é impossível ou dificultado por algum fator.

A SA é principalmente aplicada a problemas que envolvem análise combinatória e tem sua lógica fundamentada numa analogia ao processo de aquecimento e posterior resfriamento de um metal, nesse processo há a necessidade de minimizar a energia do sistema durante o processo de redução de temperatura, de forma análoga, o algoritmo simula a substituição da solução atual por uma solução próxima, escolhida de acordo com uma busca vizinha com base no algoritmo de Metropolis. À medida que o algoritmo progride, a solução tende a convergir para uma solução ótima local que minimize a energia do sistema (LAARHOVEN e AARTS, 1987).

A partir desse cenário, é possível perceber que para a elaboração do planejamento florestal, problemas de grande dimensão são gerados, envolvendo variáveis inteiras capazes de exigir enorme esforço computacional, considerando os métodos de resolução tradicionais. Por outro lado, estratégias ligadas a sistemas inteligentes e associados a soluções iniciais aprimoradas tendem a beneficiar o processo de refinamento de busca por soluções, demonstrando avanços no campo dos métodos híbridos, como por exemplo, o uso conjunto do *Simplex* e da metaheurística *Simulated Annealing*.

2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi utilizar e testar um método híbrido para a resolução de um problema de regulação florestal, envolvendo variáveis inteiras, considerando o uso integrado entre a programação linear (PL) e a metaheurística *Simulated Annealing* (SA).

Como objetivo específico foi realizada a comparação entre as soluções geradas por cada uma das diferentes estratégias testadas: a) programação linear inteira (PLI), b) metaheurística *Simulated Annealing* (SA) e c) estratégia híbrida de uso da solução gerada pela programação linear (PL) como *input* na solução inicial da metaheurística *Simulated Annealing* (SA). A comparação avaliou o volume de madeira anual gerado (m^3), tempo de processamento (segundos) e o desvio do valor presente líquido (VPL), considerando diferentes cenários relacionados a estrutura inicial da floresta simulada (produtividade e classe de idade).

3 Material e Métodos

3.1 Caracterização do Problema Florestal

O problema florestal foi caracterizado pela necessidade de se achar soluções práticas e viáveis para maximizar o valor presente líquido (VPL) da floresta, assim como atingir as metas volumétricas anuais. De acordo com Rezende e Oliveira (2001), o VPL de um projeto de investimento pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado, sendo definido pela equação (1):

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j} \quad (1)$$

Em que: j – ano considerado dentro do horizonte de planejamento; C_j – custo final do ano j ; R_j – receita no final do ano j ; i – taxa de juros; n – horizonte de planejamento.

O modelo matemático (Modelo I) teve como referência Johnson e Scheurmann (1977) e seguiu os moldes da programação linear clássica, entretanto considerando variáveis binárias $\{0,1\}$ onde a Função Objetivo (2) foi criada para maximizar o valor presente líquido (VPL), contando ainda com a inclusão de restrições de adoção de apenas uma alternativa de manejo por unidade de talhão (3), controle do fluxo de produção volumétrica a partir de um limite anual mínimo (4) e máximo (5), já a equação (6) é a condição de uso para variáveis binárias.

Função Objetivo:
Maximizar

$$VPL = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P C_{ij} X_{ij} \quad (2)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^P X_{ij} = 1, \quad \forall_{i=1,2,\dots,M} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P V_{ij} X_{ijT} \geq L_{inferior}, \quad \forall_{T=1,2,\dots,7} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P V_{ij} X_{ijT} \leq L_{superior}, \quad \forall_{T=1,2,\dots,7} \quad (5)$$

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

Em que: M – número total de talhões manejados; P – número total de alternativas de manejo; X_{ij} – variável binária $\{0,1\}$ de decisão de modelo, referente ao talhão i e alternativa de manejo j ; C_{ij} – valor presente líquido pertencente ao talhão i segundo a alternativa de manejo j ; T – ano dentro do tempo de planejamento; V_{ij} – volume total produzido no talhão i pela alternativa de manejo j .

As idades mínima e máxima dos talhões aptos para a colheita florestal foram de 5 e 8 anos, respectivamente, onde o talhão não poderia ser cortado fora desse intervalo. O sistema silvicultural utilizado foi o alto fuste, onde ao cortar um talhão na sua totalidade, o mesmo material genético seria plantado na sequência, a ciclos contínuos. A taxa de juros adotada foi de 8% ao ano e o preço de venda da madeira de R\$ 73,00/m³. Os custos totais de implantação e condução da floresta utilizados no cálculo do valor presente líquido (VPL) foram obtidos de acordo com o estudo realizado por Oliveira et.al (2009), conforme a Tabela 1. As metas volumétricas foram estabelecidas empiricamente, sendo definido como limite inferior o volume de 17.500m³ e o limite superior 32.500m³ por ano do horizonte de planejamento.

Tabela 1 - Custos da implantação do plantio de eucalipto por cultivo mínimo.

Atividades	Anos	Máquinas (R\$/ha)	Mão-de-obra (R\$/ha)	Insumos (R\$/ha)	Total
Controle de Formiga	0,1,2	0,00	30,00	20,00	50,00
Controle de plantas daninhas	0,1,2	74,40	0,00	32,00	106,40
Subsolagem sem adubação de base	0	61,80	3,22	0,00	65,02
Plantio	0	0,00	62,00	444,40	506,40
Adubação de base (NPK)	0,1	0,00	16,40	108,50	124,90
Replântio	0	0,00	10,33	13,33	23,66
Custo da Terra	1,... ,N	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo / ha					876,38

Onde: Máquinas - custo hora/máquina; Mão-de-obra – custo homem/hora ou homem/dia.
Fonte: Oliveira et.al (2009).

3.2 Floresta Simulada Virtual

A partir da definição do problema a ser estudado foi necessário utilizar uma área contendo um projeto florestal. Sendo assim, a opção adotada foi o uso da simulação para gerar um povoamento denominado de Floresta Simulada Virtual (FSV). A simulação é uma técnica amplamente difundida, que apresenta como benefícios uma redução dos custos na obtenção dos dados de campo, permitindo ainda produzir diversos arranjos e explorar uma vasta opção de cenários. Com base nesta premissa, foi gerada uma FSV, a partir de recursos computacionais, de maneira mais próxima a uma situação real, onde suas taxas de crescimento e produção foram consideradas a partir do modelo de Clutter (1963) para simular volumes em diferentes idades, cujas relações funcionais são:

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{S} + \beta_2 \frac{1}{I_2} + \beta_3 \frac{I_1}{I_2} \ln(G_1) + \beta_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \beta_5 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S + \varepsilon \quad (7)$$

Em que: \ln - logaritmo neperiano; V_2 - volume por hectare na idade desejada; I_2 - idade desejada; I_1 - idade presente; G_1 - área basal presente por hectare; S - índice de sítio; $\beta_0 \dots \beta_5$ - parâmetros do modelos; ε - erro aleatório.

A equação empregada foi obtida por Scolforo (2006) para floresta de eucalipto, apresentando as seguintes medidas de precisão: $R^2= 99,07\%$, $S_{yx}= +6,85m^3$ e Média dos Resíduos= $-0,63332$. Onde seus parâmetros foram: $\beta_0= 2,49993$; $\beta_1= -12,24170$; $\beta_2= -1,40197$; $\beta_3= -1,40197$; $\beta_4= 2,83214$ e $\beta_5= 0,0447103$.

A floresta simulada virtual foi dimensionada para compreender uma área total de 800 ha, composta por 80 talhões com 10 ha cada. Foram ainda simulados dois tipos de floresta, em relação à distribuição dos talhões por classes de idades, sendo proposta a seguinte classificação:

- a) Floresta Tipo I – representa uma floresta com 80% dos talhões nas classes de idades entre 2 e 6 anos;
- b) Floresta Tipo II – representa uma floresta com 70% dos talhões nas classes de idades superiores a 4 anos.

Dentro das florestas simuladas foram criadas três classes de produtividades (A, B e C) de acordo com o número de talhões distribuídos dentro de cada classe de sítio (Tabela 2). O índice de sítio utilizado foi ajustado por Scolforo (2006) considerando para o modelo de Chapman e Richards (1959), onde Sítio I= 32,5m; Sítio II= 29,5m; Sítio III= 26,5m; Sítio IV= 23,5m e Sítio V= 20,5m. As classes de produtividade da floresta referem-se à distribuição no número de talhões por classe de sítio, o que influencia diretamente o volume gerado ao final da rotação, sendo classificado em: a) Produtividade A – os talhões foram igualmente distribuídos nos quatro sítios; b) Produtividade B – 70% dos talhões nos sítios IV e V (menos produtivos) e c) Produtividade C – 60% dos talhões nos sítios III e IV (mais produtivos).

Tabela 2 - Distribuição percentual dos talhões nos cenários.

Cenários	Floresta	Produtividade	Distribuição dos talhões por Sítio			
			Sítio I	Sítio III	Sítio IV	Sítio V
1	Tipo I	A	20	20	20	20
2	Tipo I	B	12	12	16	40
3	Tipo I	C	16	24	24	16
4	Tipo II	A	20	20	20	20
5	Tipo II	B	12	12	16	40
6	Tipo II	C	16	24	24	16

OBS: o sítio II não foi usado, pois não existiam talhões nessa classe, conforme Scolforo (2006).

As florestas simuladas totalizaram seis cenários, que somados as metas volumétricas (Tabela 3), permitiram confrontar o desempenho dos métodos de resolução testados, ampliando assim o número de testes, bem como o grau de dificuldade de resolução, tendo em vista a variação nas classes de idade e de produção (sítio).

Tabela 3 – Metas volumétricas utilizadas nos processamentos para os 6 cenários testados.

Cenários	Volume (m ³)	Limite %	Meta Inferior (m ³)	Meta Superior (m ³)
1	25.000	30	17.500	32.500
2	25.000	30	17.500	32.500
3	25.000	56	11.000	39.000
4	25.000	30	17.500	32.500
5	25.000	30	17.500	32.500
6	25.000	30	17.500	32.500

3.3 Métodos de Resolução

3.3.1 Programação Linear Inteira

Devido às características do problema retratado, que exige o uso de variáveis binárias $\{0,1\}$, foi utilizada a PLI por meio do algoritmo *branch-and-bound* como método de resolução. Entretanto, devido à complexidade dos problemas foi fixado um tempo de duas horas de processamento, do *solver*, quando então, o mesmo seria interrompido.

3.3.2 Metaheurística *Simulated Annealing* (SA)

A metaheurística SA teve sua estrutura baseada em códigos binários $\{0, 1\}$, sendo semelhante à aplicada na PLI. Além disso, uma função de avaliação da solução (energia) foi criada adotando o critério de penalidades para o desvio de metas.

$$\text{Maximizar VPL} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P C_{ij} X_{ij} - \text{penalidade} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{m}^3} \right) \sum_{K=1}^T D_K \quad (8)$$

Em que: penalidade – R\$1.000,00/m³ de madeira; D – valor absoluto do desvio volumétrico de madeira (m³); K – período anual de tempo dentro do horizonte de planejamento; M – número total de talhões manejados; P – número total de alternativas de manejo; X_{ij} – variável de decisão binária $\{0/1\}$, referente ao talhão i e alternativa de manejo j; C_{ij} – valor presente líquido pertencente ao talhão i segundo a alternativa de manejo j; T – período total de tempo de planejamento; V_{ij} – volume total produzido no talhão i pela alternativa de manejo j.

A configuração utilizada para a resolução dos problemas gerados foi:

- Temperatura inicial: 30.000;
- Temperatura final: 0;
- Função de resfriamento: $T_i = \frac{(i-1) T_{i-1} + T_0}{i(1 + \log(i))}$ (9)

Em que: T_i – temperatura do sistema na iteração i; T_{i-1} – temperatura do sistema de iteração i – 1; T₀ – temperatura inicial do sistema; log – logaritmo neperiano na base 10; i – iteração atual do processo.

- Critério de parada: o critério de parada utilizado foi de 30.000 iterações;
- Distância de busca local: mudança aleatória de 10% dos códigos na *string* a cada iteração, o que representa mudanças nas alternativas de manejo por talhão;
- A estratégia de programação foi a Tradicional (KIRKPATRICK et al., 1983);

A *string*, citada no trabalho, é uma sequência numérica composta por códigos e responsável por carregar as informações do problema florestal para o campo matemático. Neste caso, adotou-se uma codificação binária $\{0,1\}$. A razão de sua escolha foi em virtude da natureza do problema base, sendo caracterizado por apresentar variáveis de decisão inteiras. A codificação da *string* é apresentada pela Figura 1. O termo U representa cada talhão pertencente à floresta avaliada, onde o mesmo foi subdividido conforme o número de anos de avaliação do projeto (horizonte de planejamento).

A estratégia foi popular todos os códigos com variáveis binárias $\{0,1\}$, escolhidas de forma randômica, a combinação destes códigos binários retrata a capacidade de cada U em ativar uma alternativa de manejo, assim o valor 1 ativa uma determinada opção de manejo para o talhão em um dado período de tempo (t), dentro do horizonte de planejamento definido, e o valor 0 ao contrário, não ativa tal opção.

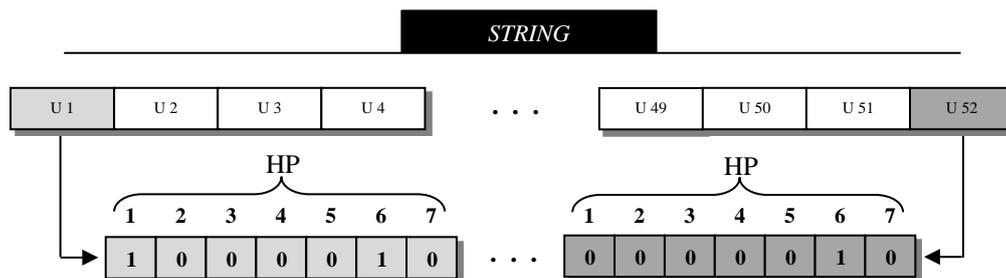


Figura 2: Exemplificação da codificação binária utilizada na *string* pertencente à metaheurística SA.

Desta maneira, cada alteração no código proporciona uma alteração na opção de manejo adotada para aquela unidade, e conseqüentemente na sua receita e produção volumétrica, codificando assim o problema. Uma opção de manejo representa um conjunto de operações a serem aplicadas no povoamento, neste caso, foi considerado como opção de manejo apenas o agendamento da colheita florestal, ou seja, a definição do período de tempo (t) onde deve ser realizado o corte raso da unidade selecionada.

3.3.3 Método Híbrido: Simplex – *Simulated Annealing*

O princípio do método híbrido consiste no uso de uma solução factível, para o problema em questão, gerada pelo modelo de programação linear (PL), como *input* para a metaheurística SA. Sabe-se que a solução via PL pode comprometer a integridade do talhão, sendo possível fracionar o talhão adotando diferentes alternativas de manejo para o mesmo, o que é indesejável para o operacional. Assim, a estrutura do método foi trabalhar o arredondamento da solução inicial de forma aleatória, e na sequência usar a metaheurística SA para atender as seguintes especificações: a) Respeitar as metas volumétricas no horizonte de planejamento e b) Utilizar uma única alternativa de manejo por talhão. A hipótese que sustenta o desenvolvimento do método híbrido está ligada à qualidade da solução inicial como *input*, ou seja, teoricamente quanto melhor a solução inicial, melhor a solução final ao se empregar métodos aproximativos de busca, como a SA.

Sendo assim, a PL produziu uma solução ótima local para o problema, essa foi então arredondada de forma empírica, para então ser usada como *input* da SA. Assim, partindo de uma solução inicial de alta qualidade, espera-se o refinamento das soluções posteriores e desta maneira encontra-se uma solução mais próxima do ótimo global pela SA.

3.3.4 Implementação Computacional e Processamento

A implementação da metaheurística foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação Visual Basic® versão 6.0 Enterprise da Microsoft®, criando-se então uma ferramenta conforme Gomide (2009). Os modelos matemáticos de PLI foram escritos por essa ferramenta, porém o seu processamento foi realizado através do software LINGO 9.0 (*Language for Interactive General Optimizer*). O processamento foi executado em um computador com processador Intel® CORE™ i3-2100 CPU @ 3.10 GHz e 8 Gb de RAM, sendo avaliados 30 repetições por cenário gerado, com base no *clock* do computador. Todas as análises realizadas foram baseadas somente em estatística descritiva.

4 Resultados e Discussões

O uso das florestas simuladas demonstrou ser perfeitamente viável em estudos envolvendo o teste de metodologias na área de otimização, pois obteve resultados consistentes em um curto

período de tempo. Inicialmente, os seis cenários foram processados considerando a PLI, onde na Tabela 4 são apresentados os resultados.

Tabela 4: Resultados obtidos pelo processamento utilizando a PLI para cada cenário.

Cenário	Floresta	Estratégia	Tempo de Processamento (s)	VPL (R\$)	Nº de Restrições
1	Tipo I	PLI	7.200	3.831.980,00	80
2	Tipo I	PLI	7.200	3.042.414,00	80
3	Tipo I	PLI	7.200	3.904.317,00	80
4	Tipo II	PLI	7.200	4.270.037,00	80
5	Tipo II	PLI	7.200	3.540.882,00	80
6	Tipo II	PLI	7.200	4.189.396,00	80

Observa-se que os cenários 4, 5 e 6 que representam a floresta Tipo II quando comparados aos cenários 1, 2 e 3 (Tipo I), apresentam os maiores valores de VPL, pois os mesmos geraram uma maior produção volumétrica por hectare. O cenário 2 e o cenário 5 possuem o menor número de talhões nas melhores classes de produtividade, por isso obtiveram os menores valores de VPL quando comparados com os demais.

Os 6 cenários testados e os métodos de resolução (SA, Híbrido) mostraram uma grande diversidade de soluções após 30 processamentos, em virtude das características estocásticas de busca da metaheurísticas SA. Considerando as 30 soluções, a que apresentou o maior valor de VPL foi escolhida para representar o cenário. Também se observou que os cenários pertencentes as florestas Tipo I apresentaram maior coeficiente de variação (CV) dos valores gerados para o VPL, quando comparados as florestas Tipo I como demonstra a Tabela 5, mostrando ser um cenário mais complexo para se atingir as metas.

Tabela 5: Resumo das melhores soluções obtidas pelos métodos testados envolvendo a SA.

Cenários	Estratégia	VPL (R\$)	Processamento da SA		VPL		Ganho (R\$)
			Tempo (s)	CT (%)	Média	CV%	
1	SA	3.783.804,25	20	0,28	3.756.477,50	0,34	-
	Híbrido	3.785.025,50	24	0,33	3.755.840,93	0,40	1.221,25
2	SA	2.992.327,25	20	0,28	2.975.127,27	0,31	-
	Híbrido	2.996.228,25	22	0,31	2.979.083,97	0,30	3.901,00
3	SA	3.873.969,00	20	0,28	3.855.405,90	0,28	-
	Híbrido	3.870.186,75	22	0,31	3.854.722,33	0,22	-3.782,25
4	SA	4.187.327,50	20	0,28	4.111.154,40	1,05	-
	Híbrido	4.202.895,50	21	0,29	4.127.446,63	0,80	15.568,00
5	SA	3.482.861,75	20	0,28	3.440.474,80	1,07	-
	Híbrido	3.491.158,00	26	0,36	3.443.602,33	0,88	8.296,25
6	SA	4.114.448,75	20	0,28	4.033.249,53	1,22	-
	Híbrido	4.137.577,00	23	0,32	4.055.794,07	0,72	23.128,25

Onde: CT – consumo de tempo de processamento dos métodos em relação ao tempo de processamento da PLI; Ganho - ganho em reais do método híbrido em relação a metaheurística SA via solução inicial aleatória; cenários 1, 2 e 3 floresta Tipo I e cenários 4, 5 e 6 floresta Tipo II.

Observando o tempo de processamento, pode-se perceber que a estratégia híbrida apresentou um tempo superior a metaheurística SA. O tempo de processamento do método híbrido correspondeu a 0,32%, em média, do tempo de processamento da PLI. Já o tempo de processamento da metaheurística SA foi 0,28%, em média, do tempo utilizado pela PLI. Os resultados obtidos pelo método híbrido quando comparados com a PLI, mostraram que o método foi capaz de obter respostas factíveis para os seis cenários em um curto período de tempo.

Considerando o VPL, observou-se que a estratégia híbrida foi superior em relação à metaheurística SA, em cinco dos seis cenários, exceto para o cenário 3. Observou-se que o cenário 3 possuiu VPL de R\$3.873.969,00 no processamento via metaheurística SA e o processamento pelo método híbrido obteve VPL de R\$3.870.186,75, mostrando uma perda de R\$3.782,25. No cenário 6 obteve-se a maior diferença entre os valores de VPL, sendo que o híbrido gerou VPL de R\$4.137.577,00, enquanto a metaheurística SA obteve um valor de VPL de R\$4.11.448,75, representando um ganho de R\$23.128,25.

Na Tabela 6 encontram-se os desvios em porcentagem do VPL e do volume obtidos pelo método híbrido e pela metaheurística SA quando comparadas aos valores obtidos pela programação linear inteira binária. Os cenários compreendidos dentro da floresta velha apresentaram um maior desvio em porcentagem volumétrica que os cenários da floresta intermediária, isto demonstra que com o aumento da maturidade da floresta a complexidade da resolução do problema também aumenta.

Tabela 6: Eficácia das estratégias metaheurísticas em relação à PLI para a produção volumétrica e valor presente líquido.

Cenário	Comparação	Desvio (%) VPL	Desvio Vol (%)
1	PLI x SA	1,26	0,46
	PLI x Híbrido	1,23	0,39
2	PLI x SA	1,65	0,65
	PLI x Híbrido	1,52	0,72
3	PLI x SA	0,78	0,54
	PLI x Híbrido	0,87	0,27
4	PLI x SA	1,94	1,41
	PLI x Híbrido	1,57	1,22
5	PLI x SA	1,64	1,1
	PLI x Híbrido	1,4	0,68
6	PLI x SA	1,79	1,41
	PLI x Híbrido	1,24	1,28

O baixo desvio obtido entre os métodos (Híbrido e SA) frente a PLI podem ser observados na Figura 2, que apresenta a distribuição dos volumes ao longo dos anos do horizonte de planejamento. No caso do cenário 1, constatou-se que os valores gerados pelos métodos metaheurística SA e Híbrido foram muito próximos aos volumes da estratégia PLI, e seu volume total estiveram a 99,54% e 99,61%, respectivamente, do volume total após 2 horas de processamento.

Os volumes gerados nos anos 3, 4 e 5 do horizonte de planejamento no cenário 6 divergiram nos métodos empregados. Contudo, o método híbrido apresentou um desvio de 1,28% do volume em relação a PLI e a metaheurística SA obteve um desvio de 1,41% quando comparado com a PLI, demonstrando que o método híbrido foi superior em 0,13% a metaheurística SA, o que representou 264,3018m³.

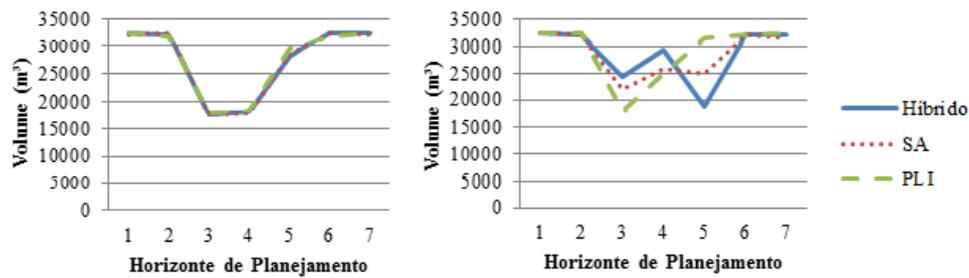


Figura 2: Gráfico de volumes nas três estratégias ao longo do horizonte de planejamento. Cenário 1 (direita) e Cenário 6 (esquerda).

Na Tabela 7 observa-se os volumes (m^3) ao longo dos sete anos do horizonte de planejamento e o volume total gerado nos três métodos adotados. O cenário 2 obteve um comportamento diferente dos demais cenários, onde o método híbrido apresentou um volume total de $169.752,8m^3$, inferior ao volume total obtido pela heurística SA, $1.69.876 m^3$, isso se deve pelo fato da busca ser aleatória, sendo que para esse caso a mesma não conseguiu melhorar a solução encontrada.

Tabela 7: Distribuição da produção volumétrica ao longo dos anos no horizonte de planejamento.

C	M	Horizonte de Planejamento Vol (m^3)							Total
		1	2	3	4	5	6	7	
1	PLI	32431,16	31991,61	17668,81	18155,65	29367,43	31836,29	32492,79	193943,70
	SA	32210,62	32496,58	17514,77	17756,59	28325,53	32438,21	32302,57	193044,90
	Híbrido	32429,40	32138,63	17549,61	18102,87	28054,14	32417,31	32494,51	193186,50
2	PLI	32110,72	27374,06	17540,09	17605,91	17643,16	26292,50	32421,50	170987,90
	SA	29062,67	29859,59	17538,70	18571,15	17628,61	24786,23	32429,05	169876,00
	Híbrido	30283,84	29429,21	17530,38	17553,07	17765,96	24810,18	32380,16	169752,80
3	PLI	38874,23	37937,40	11063,53	11074,40	21488,43	38573,30	38989,32	198000,60
	SA	38703,40	37641,30	11467,66	13034,55	20025,36	37145,89	38912,47	196930,60
	Híbrido	37725,53	38976,58	11507,44	11011,23	20692,45	38851,87	38710,69	197475,80
4	PLI	32310,03	32482,65	18283,20	27571,05	31659,18	31139,84	32483,38	205929,30
	SA	32466,31	31996,50	25246,47	24222,21	25775,90	31010,34	32298,85	203016,60
	Híbrido	32236,40	32319,02	25840,80	21241,49	28585,77	31269,60	31917,87	203411,00
5	PLI	32489,94	32349,93	17713,35	17649,14	20707,91	31443,38	32408,43	184762,10
	SA	32364,54	32392,99	19515,99	18159,61	22279,52	25664,23	32360,59	182737,50
	Híbrido	32348,43	32482,40	18714,88	17512,97	21996,01	28170,94	32288,90	183514,50
6	PLI	32454,24	32436,61	17875,30	24906,35	31483,21	32112,49	32452,90	203721,10
	SA	32457,66	31987,17	22043,61	25951,89	24961,72	32003,05	31450,66	200855,80
	Híbrido	32354,85	32200,75	24228,49	29515,13	18578,43	32135,32	32107,09	201120,10

Onde: C- Cenário, M- Método de resolução.

No estudo realizado por Gomide (2009), a metaheurística *Simulated Annealing* foi aplicada em problemas de regulação florestal, envolvendo restrições de produções máximas e mínimas, tendo como objetivo a maximização do VPL. Assim comparando a metaheurística SA com a solução encontrada pela programação linear inteira (PLI), o autor chegou a conclusão que

a metaheurística SA economizou até 99,78% do tempo de processamento utilizado pela PLI, sendo a mesma tendência foi observada neste estudo.

De acordo com o estudo realizado por Melo et al. (2011), o tempo de processamento da metaheurística SA foi inferior quando comparado com a PLI, ratificando sua eficiência na resolução de problemas que envolvem planejamento florestal. Além disso a metaheurística SA apresentou valores de desvio médio reduzido em relação ao ótimo global gerado pela PLI, mostrando-se uma alternativa eficaz a esse tipo de problema. Os autores afirmaram ainda que o aumento do estágio de desenvolvimento da floresta ocasionou um maior distanciamento da solução ótima em relação a metaheurística SA, o que também pode ser observado neste estudo.

Segundo estudo realizado por Rodrigues et al. (2004), as soluções de melhor qualidade obtidas pela metaheurísticas SA ficaram cerca de 95% do valor ótimo matemático. O tempo de processamento da metaheurística SA foi dez vezes menor quando comparado ao principal algoritmo exato de solução (*branch and bound*). Contudo, a inexistência de conclusões seguras para a maioria dos problemas de planejamento florestal, em especial os maiores e, ou mais complexos, indica que essa escolha deve ser baseada na experimentação. Tendência similar foi observada no presente estudo.

Os estudos realizados utilizando a metaheurística SA e métodos híbridos, como alternativas para a resolução de problemas de regulação florestal envolvendo variáveis inteiras, mostram-se viáveis com soluções próximas as soluções ótimas encontradas no método de programação linear inteira (PLI).

5 Conclusões

- A qualidade da solução inicial influi no processo de refinamento da solução pela metaheurística SA, ou seja, quanto melhor a solução inicial, melhor será a resposta obtida ao final das buscas.
- A solução gerada pelo método híbrido foi superior em 5 dos 6 cenários testados, considerando o valor do VPL, mostrando-se mais uma vez ser eficiente para esse tipo de situação;
- O método híbrido obteve um ganho de R\$23.128,25 (cenário 6) em relação ao VPL obtido pela metaheurística SA, além de aproximar-se mais do ótimo;
- O método híbrido obteve soluções de maximização do valor presente líquido (VPL) muito próximo às soluções geradas por programação linear inteira (PLI), considerando um limite de 2 horas de processamento;
- Os volumes produzidos após o processamento pela estratégia híbrida e pela metaheurística SA atenderam as metas, porém não seguiram a mesma sequência de corte da estratégia PLI em todos os cenários;

6 Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo apoio financeiro concedido.

7 Referências

ABRAF. Anuário estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Ano base 2011. 2012.

Baskent, E. Z., Keles, S. Approaches to integrated strategic/tactical forest planning. Umea. 29f. Swedish University of Agricultural Sciences. 2005.

Boyland, M., Nelson J., And Bunnell F.L. 2005. A test for robustness in harvest scheduling models. *Forest Ecology and Management*. Netherlands, v.207, n.1, p.121-132, 2005.

Gomide, L. R. Planejamento Florestal Espacial. Curitiba. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Curitiba, 2009. 256f.

Johnson, K. N.; Scheurman, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives – discussion and synthesis.- *Forest Science*, v. 18, n.1, p. 1-31, 1997

Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.; Vecchi, M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, v. 220, n.4598 , p.671-680, 1983

Laarhoven, P. J. V. Simulated Annealing: Theory and Applications. Springer. 1987. p.2004.

Melo, E. A.; Faria, A. L. R.; Moura, A. L. M; Gomide, L. R.; Sé, D. C. Uso da metaheurística *simulated annealing* na regulação florestal considerando diferentes estágios de desenvolvimento da floresta. In: Simpósio Latino-Americano sobre Manejo Florestal; Santa Maria; Anais... Santa Maria/ RS; Universidade Federal de Santa Maria; 1076 p.; 2011.

Oliveira, R. R.; Saccá, J. P.; Marino Junior, E. Análise comparativa de custo do cultivo mínimo e cultivo convencional na implantação da cultura do eucalipto. FAEF. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, Ano VII, n.13, 2009.

Rodrigues, F. L. Metaheurísticas e Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento Florestal. Viçosa. 225f. Tese de Doutorado. UFV, 2001.

Schneider, P. R. Introdução ao manejo florestal. – Santa Maria: UFSM, 1993. 348p.

Scolforo, J. R. Biometria Florestal: Modelos de crescimento e produção florestal. Lavras, MG: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.

Rezende, J. L. P.; Oliveira, A. D. Análise econômica e social de projetos florestais. UFV. Viçosa. 2001. 389p.