

Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal em problemas de grande dimensão

Heuristics for integrating strategic and operational levels in large scale forest management problems

André O. Falcão
José G. Borges

RESUMO: Este artigo apresenta resultados de investigação com vista ao desenvolvimento de heurísticas para a solução de programas inteiros em gestão florestal. Estes problemas envolvem restrições relativas à regularidade de fluxos de volume e à especificidade da localização das intervenções produtivas. Privilegia-se o desenho de técnicas para confrontar a complexidade da solução de programas inteiros de grande dimensão e para oferecer informação de carácter estratégico e operacional ao gestor florestal. Descreve-se a implementação das heurísticas - algoritmos genéticos, simulated annealing, pesquisa tabu e sequential tempering and quenching. Recorre-se a problemas de gestão em dois sistemas de produção florestal em Portugal - *Pinus pinaster*, Ait. e *Eucalyptus globulus* Labill - para o teste e a demonstração destas heurísticas. Discutem-se os resultados das aplicações, com ênfase na análise da qualidade das soluções e da eficiência computacional.

PALAVRAS-CHAVE: Heurística, Gestão florestal, Otimização combinatória, Gestão estratégica, Gestão operacional

ABSTRACT: This paper presents results obtained after the application of some heuristics to the solution of forest management integer programming problems. Constraints dealing with the regulation of production flows and location specificity of the productive interventions were considered. Preference was given to techniques that dealt with the complexity of solving large scale integer programming problems and that offered strategic and operational information to the manager. The following heuristics are described: genetic algorithms, simulated annealing, tabu search, sequential tempering and quenching. These heuristics were applied in two different forest management problems: one *Pinus pinaster* Ait production system and one *Eucalyptus globulus* Labill production system. The results are discussed, with emphasis in the quality of the solutions and computational efficiency.

KEYWORDS: Heuristics, Forest management, Combinatorial optimization, Strategic management, Operational planning

INTRODUÇÃO

Modelos de gestão que integram preocupações com a localização geográfica das atividades florestais contribuem para evitar a

segregação dos níveis de planeamento estratégico e operacional. Para além disso, oferecem informação necessária para resolver problemas relativos ao transporte de produtos florestais e/ou ao arranjo espacial das ope-

rações culturais. Os métodos clássicos de ordenamento florestal e a programação linear (PL) não permitem formalizar e/ou otimizar problemas com estas características. A literatura científica florestal apresenta exemplos de aproximações alternativas. Hoganson e Rose (1984), Gunn e Rai (1987) e Lappi (1992), por exemplo, usaram técnicas de decomposição de formulações de PL. Formulações de programação inteira (PI) e inteira mista (PIM) foram também usadas por Kirby (1980), Covington et al. (1988), Jones et al. (1991), Hof e Joyce (1993), Murray e Church (1995b) e Snyder e ReVelle (1997). Embora a PI e a PIM permitam obter uma solução ótima para os problemas, o seu uso é restrito em consequência do elevado custo computacional.

Gunn e Rai (1987) referem-se a soluções próximas do ótimo que, por vezes, podem ser preferíveis se puderem ser produzidas com um custo computacional muito menor, dada a incerteza relativa à informação econômica, biológica e técnica na maior parte dos problemas de gestão florestal (Falcão e Borges, 2001). Este contexto evidencia a pertinência do uso de heurísticas na solução de problemas inteiros. Rodriguez (1994) desenvolveu uma heurística para análise de programas inteiros em problemas de gestão florestal de grande dimensão. Falcão e Borges (2001) desenvolveram um programa de evolução para resolver problemas da mesma natureza. O'Hara et al. (1989), Clements et al. (1990) e Nelson e Brodie (1990) usaram uma técnica de pesquisa aleatória (Programação Inteira de Monte Carlo) para a solução de um problema de gestão florestal com restrições de adjacência estrita. Weintraub et al. (1994) usaram uma técnica baseada num algoritmo de geração de colunas para a solução do mesmo tipo de problemas. Lockwood e Moore (1993), Murray e Church (1995a) e Tarp e Helles (1997) usaram simulated annealing para resolver vários tipos de proble-

mas com restrições espaciais. Murray e Church (1995a), Bettinger et al. (1998) e Boston e Bettinger (1999) testaram o uso de procura tabu. Hoganson e Borges (1998) e Borges et al. (1999) testaram uma heurística baseada em programação dinâmica para resolver um problema de adjacência estrita, referindo que esta técnica dava resultados geralmente melhores que outras heurísticas. Falcão e Borges (2002) desenvolveram uma heurística que combina componentes determinísticos e aleatórios para a solução de problemas de gestão florestal com restrições espaciais.

No âmbito deste trabalho discute-se a utilização de quatro heurísticas em solução de problemas inteiros de grande dimensão em gestão florestal: Simulated annealing, algoritmos genéticos, sequential quenching and tempering e procura tabu. A demonstração e análise das heurísticas faz-se com recursos a dois casos de estudo que refletem problemas de gestão florestal comuns em Portugal. No primeiro, considera-se uma floresta de talhadia de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill). No segundo, considera-se uma floresta de alto fuste de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait) sujeita a diferentes regimes de desbastes. Os problemas envolvem a maximização do rendimento atual líquido sujeita a restrições relativas à especificidade da localização de intervenções culturais e à regularidade de fluxos de material lenhoso. Os resultados das 4 heurísticas foram comparados entre si em nível da qualidade das soluções obtidas, custos computacionais e satisfação das restrições.

FORMULAÇÃO E MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Formulação do problema

Seguindo uma formulação do tipo Modelo I (Johnson e Scheurman, 1977), um problema inteiro que permite determinar a localização geográfica das intervenções produtivas, pode

ser descrito da seguinte forma (Falcão e Borges, 2001):

Em que ,

$$\text{Maximizar VAL} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

sujeito a,

$$\sum_{j=1}^{M_i} x_{ij}, \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} v_{ijpt} x_{ij} \geq (1 - d_{pt}) V_{pt}, \quad p = 1, 2, \dots, P \wedge t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} v_{ijpt} x_{ij} \leq (1 + d_{pt}) V_{pt}, \quad p = 1, 2, \dots, P \wedge t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

$$x_{ij} = I \vee x_{ij} = 0, \quad \forall i, \quad \forall j = 1, \dots, M_i \quad (5)$$

N = número de unidades de gestão.

M_i = número de alternativas para a unidade de gestão i.

P = número de produtos

T = número de períodos de planeamento

x_{ij} = variável binária igual a 1 se a alternativa j for escolhida para a unidade de gestão i e 0, caso não o seja.

c_{ij} = valor presente líquido associado à alternativa j para a unidade de gestão i; inclui o valor do inventário final.

v_{ijpt} = produção do produto p no período t que resulta da aplicação da alternativa j à unidade de gestão i.

V_{pt} = Volume do produto p que se pretende realizar no período t

d_{pt} = desvio admissível do objetivo de realização do volume do produto p no período t.

A equação (1) exprime o objetivo de gestão de maximizar o valor presente líquido (VPL) da floresta. A equação (2) garante que uma e apenas uma alternativa é aplicada a cada unidade de gestão. As equações (3) e (4) obrigam a que os volumes produzidos satisfaçam os objetivos de gestão para cada período de planeamento. Finalmente a equação (5), refere-se aos requisitos binários das variáveis de ges-

tão. De uma forma geral, este tipo de problemas de otimização combinatória envolve um grande número de variáveis e restrições (Falcão e Borges, 2001).

Métodos de solução

Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos, também designados de programas de evolução, baseiam-se num mecanismo de procura paralela de uma solução ótima com recurso ao desenho de conjunto de vectores (cromossomas) de solução e à definição de mecanismos de evolução (e.g. crossover, mutação e seleção) destes vectores. Mullen e Buttler (1997) usaram algoritmos genéticos para resolver problemas de gestão florestal que incorporavam restrições espaciais de adjacência. Falcão e Borges (2001) usaram um programa de evolução para resolver um problema inteiro de planeamento florestal sujeito a restrições de volume para dois produtos. Os algoritmos genéticos, em consequência do número de operadores envolvidos e à sua natureza intrinsecamente paralela, são difíceis de implementar e parametrizar. O seu tempo de solução é, geralmente, proporcional ao número de cromossomas usados. Na abordagem seguida neste artigo, a população inicial de cromossomas decorre da geração aleatória do valor de cada gene em cada cromossoma (i.e. da atribuição de uma alternativa de gestão a cada unidade de gestão). Os cromossomas assim gerados sofrem sequencialmente os 3 operadores genéticos de forma a constituir uma nova população, que será, devido ao mecanismo de seleção descrito por Falcão e Borges (2001), melhor que a inicial. Os parâmetros considerados no âmbito da aplicação do algoritmo incluem o número de iterações, a taxa de mutação, a taxa de crossover, a intensidade de seleção e frequência de reposição do ótimo (Falcão e Borges, 2001).

Procura tabu

A procura tabu foi utilizada por Bettinger et al. (1998) e por Boston e Bettinger (1999) com bons resultados na solução de problemas de gestão florestal sujeitos a restrições de adjacência. Após a geração aleatória de uma solução inicial, esta heurística, investiga a sua vizinhança no espaço de soluções e seleciona o movimento com impacto mais favorável sobre o valor da função objetivo. Este movimento é confrontado com os últimos movimentos realizados que são registrados numa lista tabu. Caso faça parte da lista ele é recusado, sendo selecionado o próximo elemento que não se encontre nesta lista. A procura tabu é fácil de parametrizar. No entanto, devido à pesquisa exaustiva de vizinhanças no espaço de soluções, é geralmente uma das heurísticas com pior performance computacional.

Sequential quenching and tempering (SQT)

Falcão e Borges (2002) demonstraram que a combinação de componentes aleatórios com procura sistemática pode ser uma boa estratégia de solução. A heurística SQT procura sistematicamente uma solução melhor na vizinhança da solução existente, verificando seqüencialmente, para todas as alternativas de gestão de cada povoamento, qual a que tem impacto, mais favorável sobre o valor da função de avaliação. Desta forma, ao fim de uma iteração, todas as unidades de gestão foram potencialmente modificadas. Este processo é repetido até um ótimo local ser alcançado, i.e., até não ser possível obter soluções melhores. Então é efetuada uma perturbação, onde é associada, ao acaso, a um determinado número de povoamentos, uma alternativa de gestão também aleatoriamente escolhida. O processo prossegue ao longo de iterações em número a especificar pelo utilizador. A intensidade das perturbações é aumentada por um fator fixo até

a heurística atingir o espaço de soluções admissíveis (Falcão e Borges, 2002)

Simulated annealing

A heurística simulated annealing envolve uma seqüência de iterações que modificam, de uma forma aleatória, a solução presente (Pham e Karaboga, 2000) aceitando sempre as modificações que melhoram o seu valor objetivo. Para evitar uma convergência prematura para um ótimo local, uma solução inferior pode ser aceita, mas essa possibilidade é condicionada por uma função de probabilidade. Contudo essa função é dependente do número de iterações já decorridas, diminuindo a probabilidade com o tempo de processamento (Reeves, 1993). Vários autores usaram o simulated annealing para resolver problemas de vários tipos em gestão florestal (e.g. Lockwood e Moore, 1993, Murray e Church, 1995a, Tarp and Helles, 1997 e Boston e Bettinger, 1999). Fundamental para a implementação desta heurística é a parametrização da função de probabilidade que regula a aceitação de movimentos inferiores (Pham and Karaboga, 2000). Geralmente, o utilizador especifica um parâmetro inicial da função e o agenciamento da modificação desse parâmetro. O processo de convergência é geralmente interrompido quando esse parâmetro atinge um valor mínimo, ou quando se conclui um número pré determinado de iterações. Neste artigo, o algoritmo produz aleatoriamente uma solução inicial (associando uma alternativa a cada unidade de gestão). Uma solução nova é produzida afetando aleatoriamente uma nova alternativa de gestão a um povoamento escolhido da mesma forma. Caso a nova solução seja melhor que a anterior, esta é aceita; se for pior, a aceitação deste movimento é condicionada pela função de probabilidade que é decrescente ao longo do processo de convergên-

cia, i.e. a probabilidade de aceitação de movimentos inferiores é maior nas instâncias iniciais do processo de convergência.

CASOS DE ESTUDO E RESULTADOS

Florestas de teste

Duas florestas artificiais foram criadas e simuladas. A floresta A integra povoamentos puros de Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster* Ait) sujeitos ao regime de silvicultura da Mata Nacional de Leiria em Portugal (Falcão, 1997). A área florestal de 125.000 ha distribui-se por 20.000 unidades de gestão com dimensão compreendida entre 0,25 ha e 58,0 ha. A estrutura etária corresponde a uma floresta envelhecida. Considerou-se um horizonte de planeamento de 70 anos. Os modelos de silvicultura envolveram revoluções compreendidas entre os 50 e os 100 anos. Considerou-se a ocorrência quinquenal de desbastes que deixam 20 ou 22 m² de área basal residual, entre os 20 e os 50 anos. Com este conjunto de parâmetros, foram geradas 706.158 alternativas de gestão, totalizando cerca de 5.626.462 intervenções produtivas. Especificou-se um objetivo anual de produção de 9.3×10^5 m³ de pinho. Considerou-se a possibilidade de flutuações de 5% em redor do volume pretendido.

A floresta B, corresponde a uma mata de 500.000 ha, com 40.000 povoamentos puros de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) com idades compreendidas entre os 0 e os 16 anos. Os povoamentos têm áreas compreendidas entre os 0,25 e os 54 ha. Considerou-se um horizonte de planeamento de 25 anos. Os modelos de silvicultura envolveram um regime de talhadia com 3 rotações (2 cortes). As idades de corte permitidas variaram entre os 10 e os 17 anos. Com base nestas especificações, foram simuladas 1.228.170 alternativas de ges-

tão, que envolvem 2.266.357 intervenções produtivas. Especificou-se um objetivo anual de produção de 5.5×10^6 m³ de eucalipto. Considerou-se a possibilidade de flutuações de 5% em redor do volume pretendido.

RESULTADOS

Foi utilizada a linguagem de desenvolvimento Ms Visual Basic 6.0 para a implementação de todas as heurísticas devido à facilidade de desenvolvimento, robustez da linguagem e facilidade na criação de interfaces com o utilizador. Para a implementação das heurísticas bem como para todos os testes efetuados, foi utilizada um computador com um processador Pentium III a 866 MHz e 256 MBytes de RAM. O sistema operativo utilizado foi o Ms Windows 2000 Professional. Foram efetuados alguns testes preliminares por forma a estimar valores dos parâmetros para cada heurística.

Algoritmos genéticos

Considerou-se uma população de 20 cromossomas com uma taxa de mutação decrescente ao longo do processo de convergência, no caso de ambas as florestas de teste. A taxa de crossover foi de cerca de 10 % e recorreu-se a uma estratégia de reposição da melhor solução encontrada em cada 10 iterações. Para ambas as florestas o parâmetro de intensidade de seleção foi de 3. O número de iterações foi de 40.000 e de 90.000 no caso, respectivamente, das florestas A e B.

Procura tabu

No caso da floresta A usou-se uma lista tabu com 500 movimentos ao longo de 35.000 iterações. No caso da floresta B, usou-se uma lista tabu com 1.000 elementos, tendo o processo de convergência decorrido ao longo de 55.000 iterações.

Sequential quenching and tempering

Considerou-se a implementação de perturbações em 0,1 a 0,2% do número de unidade de gestão em cada floresta de teste. Estes valores foram incrementados em 10% quando se atinge um ótimo local fora do espaço de soluções admissíveis. O número de iterações foi de 100 e de 200 no caso, respectivamente, das florestas A e B.

Simulated annealing

Considerou-se um parâmetro de inicialização da função de probabilidades ("temperatura") de 5, sendo a taxa de "arrefecimento" de 0,99. Os parâmetros que regulam a forma como o arrefecimento é conduzido não foram modificados, tendo-se mantido constantes para as duas florestas. Para a floresta A executaram-se 60.000 iterações, sendo que para a floresta B, o processo tomou 100.000 iterações.

Programação linear

Para testar e comparar as heurísticas recorreu-se à solução dos dois problemas usando o software CPLEX (ILOG, 1997) de programação linear (PL). A PL, para este tipo de problemas, permite encontrar o ótimo global do sistema, apesar de não garantir soluções inteiras, i.e., pode ocorrer a fragmentação das unidades de gestão. No entanto como o número de unidades fragmentadas na solução é sempre

inferior ao número das restrições, no presente caso, este número atingirá um máximo de 70 e de 25 no caso, respectivamente, das florestas A e B.

Análise das soluções

No caso da floresta A, o SQT demonstrou ser a heurística mais eficiente. A sua melhor solução situou-se a cerca de 2% da solução obtida pela programação linear (Tabela 1), ao que corresponde um custo de 141.7 USD/ha. As soluções pelas outras heurísticas envolveram custos superiores em mais do dobro (Tabela 1). A pior solução foi obtida pela procura tabu. Apesar da menor dimensão do problema, a pesquisa de soluções admissíveis foi menos bem sucedida no caso da Floresta A. Por exemplo, nem o simulated annealing nem os algoritmos genéticos permitiram obter soluções admissíveis.

No caso da floresta B, a procura tabu demonstrou ser a heurística mais eficiente, estando a sua solução a apenas 0,46% do valor obtido pela programação linear, o que representa um custo de cerca de 14 USD/ha. O SQT e o simulated annealing apresentaram também valores muito próximos da programação linear, situando-se, respectivamente a 0,93% e a 1,68% dos valores obtidos com recurso a esta técnica de programação matemática. A pior solução foi obtida pelos algoritmos genéticos (Tabela 1).

Tabela 1

Qualidade das soluções obtidas pelas diferentes heurísticas para as florestas de teste
(Quality of solutions obtained by different heuristics to the test forests)

	Floresta A			Floresta B		
	Solução (10 ⁶ USD)	Desvio PL (%)	Custo/Ha (USD)	Solução (10 ⁶ USD)	Desvio PL (%)	Custo/Ha (USD)
Programação Linear	879,8	-	-	1539,9	-	-
Algoritmos Genéticos	824,6 (*)	6,27(*)	441,3(*)	1457,9	5,33	164,1
Procura Tabu	824,2	6,32	444,8	1532,9	0,46	14,1
Seq. Quenching and Tempering	862,1	2,01	141,7	1525,5	0,93	28,8
Simulated Annealing	841,4 (*)	4,37(*)	307,5(*)	1514,1	1,68	51,7

(*) Não foram obtidas convergências para estas heurísticas

Tabela 2

Tempos de solução requeridos pelas heurísticas em estudo para ambas as florestas de teste (Solution times required by the heuristics for both forest cases)

	Floresta A		Floresta B	
	Tempo de Solução(s)	Dif. para PL (%)	Tempo de Solução(s)	Dif. para PL (%)
Programação Linear	5314	-	1530	-
Algoritmos Genéticos	4000	75,3	3225	210,8
Procura Tabu	30780	579,2	43560	2847,1
Seq. Quenching and Tempering	350	6,6	440	28,8
Simulated Annealing	320	6,0	258	16,9

A análise do tempo de solução evidencia a procura tabu cujo custo computacional se situou entre os 570% e os 2900% do custo associado à utilização da programação linear (Tabela 2). Os algoritmos genéticos, no caso da floresta A, demoraram 75 % do tempo necessário para a resolução do problema pela PL, e no caso da Floresta B, demoraram um pouco mais do dobro. O SQT e o simulated annealing foram as heurísticas que demonstraram melhor performance computacional, conseguindo obter soluções com tempos de utilização de CPU semelhantes para ambos os casos de teste, notando-se alguma vantagem para o simulated annealing, que se mostrou em ambos os casos como a heurística mais rápida, apesar de, como já foi notado não ter logrado atingir o espaço de soluções admissíveis no caso da floresta A (Tabela 2).

CONCLUSÕES

Demonstrou-se que o uso de heurísticas pode resolver com sucesso problemas de planeamento florestal de grande dimensão, estando os seus resultados próximos dos obtidos por intermédio da resolução do problema gerado usando programação linear e sendo, de uma forma geral, os seus custos computacionais menores. Das heurísticas testadas verificou-se a superioridade em eficiência computacional do simulated annealing, apesar de esta heurística por vezes convergir para um ótimo local (por vezes fora do espaço de solu-

ções admissíveis) demasiado cedo. A heurística sequencial quenching and tempering, mostrou-se robusta a convergir para soluções próximas do ótimo global, evidenciando um tempo de computação aceitável. Os algoritmos genéticos, provavelmente devido à dificuldade na sua parametrização, evidenciaram maiores dificuldades em atingir valores mais próximos do ótimo. Em contrapartida a procura tabu, sendo marcadamente o método de solução mais lento, mostrou um comportamento díspar, sendo a pior e a melhor heurística na comparação da qualidade das soluções, para os dois casos abordados.

As heurísticas podem, com sucesso, abordar problemas de maior complexidade intratáveis com PL, como, por exemplo, problemas de transporte, ou que incluam restrições espaciais ou de caráter ambiental. Da mesma forma, o emprego de técnicas heurísticas pode ser usado em problemas clássicos de gestão florestal, em que a fragmentação de unidades de gestão que ocorre pela aplicação de métodos que não garantam soluções inteiras, seja demasiado grande.

AUTORES E AGRADECIMENTOS

ANDRÉ O. FALCÃO é Investigador de Pós-Doutoramento no Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia - Tapada da Ajuda - 1349?017 Lisboa - Portugal - E-mail: andrefalcao@isa.utl.pt

JOSÉ G. BORGES é Professor do Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia - Tapada da Ajuda - 1349?017 Lisboa - Portugal.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia, projetos PRAXIS XXI/BD/18271/98, Sapiens ref. 36332/99 e SFRH/BPD/7135/2001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BETTINGER, P.; SESSIONS, J.; JOHNSON, K.N. Ensuring the compatibility of aquatic habitat and commodity production goals in Eastern Oregon with tabu search procedure. **Forest science**, v.44, p.96-112, 1998.
- BOSTON, K.; BETTINGER, P. An analysis of Monte Carlo Integer Programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems. **Forest science**, v.45, p.292-301, 1999.
- BORGES, J.G.; HOGANSON, H.M.; ROSE, D. Combining a decomposition strategy with dynamic programming to solve the spatially constrained forest management scheduling problem. **Forest science**, v.45, p.201-212, 1999.
- CLEMENTS, S.E.; DALLAIN, P.L.; JAMNICK, M.S. An operational, spatially constrained harvest scheduling model. **Canadian journal of forest research**, v.20, p.1438-1447, 1990.
- COVINGTON, W.W.; WOOD, D.B.; YOUNG, D.L.; DYKSTRA, D.P.; GARRETT, L.D. TEAMS: a decision support system for multiresource management. **Journal of forestry**, v.86, n.8, p.25-33, 1988.
- FALCÃO, A. DUNAS: a growth model for the National Forest of Leiria. In: IUFRO WORKSHOP EMPIRICAL AND PROCESS BASED MODELS FOR FOREST TREE AND STAND GROWTH SIMULATION, Oeiras, 1997. **Proceedings**.
- FALCÃO, A.O.; BORGES, J.G. Combining random and systematic search heuristic procedures for solving spatially constrained forest management scheduling models. **Forest science**, v.48, n.3, p.608-21, 2002.
- FALCÃO, A.O.; BORGES, J.G. Designing an evolution program for solving integer forest management scheduling models: an application in Portugal. **Forest science**, v.47, n.2, p.158-168, 2001.
- FALCÃO, A.; BORGES, J.G.; TOMÉ, M. **SagFlor: an automated forest management prescription writer**. University of Joensuu. Faculty of Forestry research notes, n.97, p.211-218, 1999.
- GUNN, E.A.; RAI, A.K. Modeling and decomposition for planning long-term forest harvesting in an integrated industry structure. **Canadian journal of forest research**, v.17, p.1507-1518, 1987.
- HOF, J.G.; JOYCE, L.A. A mixed integer linear programming approach for spatially optimizing wildlife and timber in managed forest ecosystems. **Forest science**, v.39, p.816-834, 1993.
- HOGANSON, H.M.; BORGES, J.G. Using dynamic programming and overlapping subproblems to address adjacency in large harvest scheduling problems. **Forest science**, v.44, p.526-538, 1998.
- HOGANSON, H.M.; ROSE, D.W. A simulation approach for optimal timber management scheduling. **Forest science**, v.30, p.220-238, 1984.
- ILOG INCORPORATION. **CPLEX base systems**. Incline Village, 1997.
- JOHNSON, K.N.; SCHEURMAN, H.L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis. **Forest science monography**, n.18, p.1-31, 1977.
- JONES, J.G.; MENEGHIN, B.J.; KIRBY, M.W. Formulating adjacency constraints in linear optimization models for scheduling projects in tactical planning. **Forest science**, v.37, p.1283-1297, 1991.
- KIRBY, M.W. A guide to the integrated resources planning model. Berkeley: USDA. **Forest Service**, 1980. 211p.
- LAPPI, J. JLP A linear programming package for management planning. **The Finnish Forest Research Institute research paper**, n.414, p.1-134, 1992.
- LOCKWOOD, C.; MOORE, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian journal of forest research**, v.23, p.468-478, 1993.
- MULLEN, D.; BUTTLER, R. The design of a genetic algorithm based spatially constrained timber harvest scheduling model. 1997. (<http://econ.usfs.msu.edu/ssaf/ PDFfiles/>)
- MURRAY, A.; CHURCH, R. Heuristic solution approaches to operational forest planning problems. **Operation research Spektrum**, v.17, p.193-203, 1995a.

- MURRAY, A.; CHURCH, R. Measuring the efficacy of adjacency constraint structure in forest planning models. **Canadian journal of forest research**, v.25, p.1416-1424, 1995b.
- NELSON, J.D.; BRODIE, J.D. Comparison of a random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest plans. **Canadian journal of forest research**, v.20, p.934-942, 1990.
- O'HARA, A.J.; FAALAND, B.H.; BARE, B.B. Spatially constrained timber harvest scheduling. **Canadian journal of forest research**, v.19, p.715-724, 1989.
- PHAM, D.T.; KARABOGA, D. **Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks**. London: Springer-Verlag, 2000. 302p.
- REEVES, C.R. **Modern heuristic techniques for combinatorial problems**. New York: John Wiley, 1993. 320p.
- RODRIGUEZ, L.C.E. **Use of heuristic methods in the analysis of large-scale forest management integer programming models**. Athens, 1994. 93p. Tese (Doutorado). University of Georgia
- SNYDER, S.; REVELLE, C. Dynamic selection of harvests with adjacency restrictions: the SHARe model. **Forest science**, v.43, p.213-222, 1997.
- TARP, P.; HELLES, F. Spatial optimization by simulated annealing and linear programming. **Scandinavian journal of forest research**, v.12, p.390-402, 1997.
- WEINTRAUB, A.; BARAHONA, B.; EPSTEIN, R. A column generation algorithm for solving general forest planning problems with adjacency constraints. **Forest science**, v.40, p.142-161, 1994