

DANIEL HENRIQUE BREDÁ BINOTI

**ESTRATÉGIAS DE REGULAÇÃO DE FLORESTAS EQUIÂNEAS COM
VISTAS AO MANEJO DA PAISAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B614e
2010

Binoti, Daniel Henrique Breda, 1986-

Estratégias de regulação de florestas equiâneas com vistas
ao manejo da paisagem / Daniel Henrique Breda Binoti.

– Viçosa, MG, 2010.

xii, 145f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

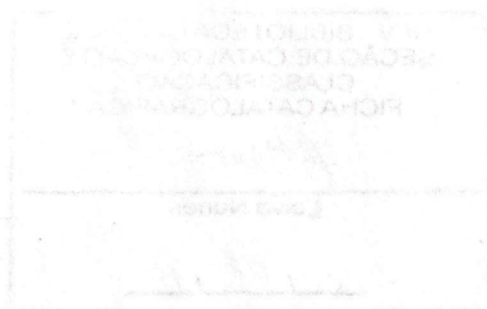
Orientador: Hélio Garcia Leite.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Paisagens florestais - Administração. 2. Algoritmos
genéticos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9907

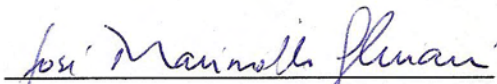


DANIEL HENRIQUE BREDA BINOTI

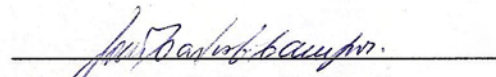
**ESTRATÉGIAS DE REGULAÇÃO DE FLORESTAS EQUIÂNEAS COM
VISTAS AO MANEJO DA PAISAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 21 de julho de 2010.



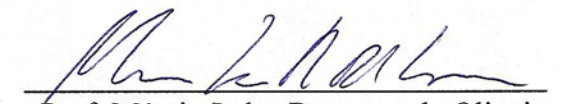
Prof. José Marinaldo Gleriani
(Co-orientador)




Prof. João Carlos Chagas Campos



Prof. Agostinho Lopes de Souza



Prof. Márcio Leles Romarco de Oliveira



Prof. Hélio Garcia Leite
(Orientador)

Dedico...

...à Deus
...a minha esposa
...aos meus pais
...aos meus avôs

Deus É Pai

Pe. Fábio de Melo

Quando o sol ainda não havia cessado seu brilho,
Quando a tarde engolia aos poucos
As cores do dia e despejava sobre a terra
Os primeiros retalhos de sombra
Eu vi que Deus veio assentar-se
Perto do fogão de lenha da minha casa
Chegou sem alarde, retirou o chapéu da cabeça
E buscou um copo de água no pote de barro
Que ficava num lugar de sombra constante.
Ele tinha feições de homem feliz, realizado
Parecia imerso na alegria que é própria
De quem cumpriu a sina do dia e que agora
Recolhe a alegria cotidiana que lhe cabe.
Eu o olhava e pensava:
Como é bom ter Deus dentro de casa!
Como é bom viver essa hora da vida
Em que tenho direito de ter um Deus só pra mim.
Cair nos seus braços, bagunçar-lhe os cabelos,
Puxar a caneta do seu bolso
E pedir que ele desenhasse um relógio
Bem bonito no meu braço
Mas aquele homem não era Deus,
Aquele homem era meu pai
E foi assim que eu descobri
Que meu pai com o seu jeito finito de ser Deus
Revela-me Deus com seu
Jeito infinito de ser homem.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A Mayra pelo apoio não somente na execução deste trabalho, mas em todos os momentos dessa nossa caminhada.

Ao professor Helio, pela oportunidade, pelos conselhos, pelas sábias correções na dissertação e nas atitudes profissionais, meus eternos agradecimentos.

Ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro e oportunidades oferecidas.

Ao Professor Marinaldo, pelos pequenos conselhos e gigantescos ensinamentos, meu muito obrigado.

À Cenibra, na pessoa de Mauro Werneburg e Cláudio Pontes, pelas oportunidades e aprimoramento profissional.

A família Breda Binoti pelos ensinamentos oferecidos por toda uma vida.

Agradeço a honra de ter incorporado correções e sugestões do professor João Campos em minha dissertação.

As sugestões fornecidas pelos professores Márcio e Agostinho, durante a apresentação da dissertação.

Agradeço ao Prof. Charles pela forma mais “exata” de pensamento, que muito contribuiu para o meu gosto pela aleatoriedade.

Aos bons amigos adquiridos durante a graduação e na estadia pelo alojamento.

Ao Joze Mauro apesar de ser astuto demais para dizer que esteve envolvido, é cúmplice em relação a tudo o que pensamos sobre esse “mundo florestal”.

BIOGRAFIA

Daniel Henrique Breda Binoti é natural de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo. Filho de Antonio Henrique Santoline Binoti e Maria José Breda Binoti, nascido em 3 de maio de 1986.

Em 2003, após muita poeira e barro, formou-se técnico agrícola na Escola Agro-técnica Federal de Alegre (EAFA), em Alegre, ES.

Iniciou o curso de engenharia florestal na Universidade Federal de Viçosa em 2004, tendo o concluído em 2009, com votos de louvor pelo desempenho acadêmico, e muita experiência culinária adquirida pelos serviços prestados no RU.

Em janeiro de 2009, iniciou o Programa de Mestrado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em 21 de julho de 2010.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO 1	6
REGULAÇÃO FLORESTAL: ENFOQUES E TÉCNICAS ANALÍTICAS	6
Métodos Matemáticos.....	7
Métodos Exatos	7
Soluções Heurísticas	9
Algoritmos Genéticos	11
Planejamento Florestal e Otimização	14
Otimização Espacial	16
Restrições de Adjacência.....	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
CAPÍTULO 2	29
REGULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FLORESTAS EQUIÂNEAS COM RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA	29
INTRODUÇÃO	29
MATERIAL E MÉTODOS	32
Descrição dos dados	32
Modelos Matemáticos.....	34
Algoritmo Genético	35
Produção, receita e custo	37

Avaliação da dispersão das intervenções nas unidades de manejo.....	39
RESULTADOS	40
DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
CAPÍTULO 3	59
REGULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FLORESTAS EQUIÂNEAS COM RESTRIÇÃO DE CLASSES DE IDADE POR COMPARTIMENTO.....	59
INTRODUÇÃO	59
MATERIAL E MÉTODOS	62
Descrição dos dados	62
Modelos matemáticos	66
Restrição de Classes de Idade por Compartimento	67
Restrição de adjacência.....	67
Algoritmo genético	67
Produção, receita e custo	68
Avaliação da dispersão das intervenções nas unidades de manejo.....	71
RESULTADOS	72
DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
CAPÍTULO 4	90
REGULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FLORESTAS EQUIÂNEAS COM INCLUSÃO DE RESTRIÇÕES AMBIENTAIS	90
INTRODUÇÃO	90
MATERIAL E MÉTODOS	93
Descrição dos dados	93
Modelos matemáticos	95
Avaliação da dispersão das intervenções nas unidades de manejo.....	97
Restrição de adjacência.....	97
Minimização do IAC	98
Maximização do VPL com penalidades pelo IAC	98
Produção, receita e custo	98
RESULTADOS	101
DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

CAPÍTULO 5	116
INCLUSÃO E INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS ESPACIAIS EM MODELOS DE REGULAÇÃO FLORESTAL.....	116
INTRODUÇÃO	116
MATERIAL E MÉTODOS	118
Descrição dos dados	119
Produção, receita e custo	121
Maximização do VPL.....	124
Minimização das variações da distância entre intervenções e o posto de entrega de madeira.....	125
Maximização do VPL com penalidades pela distância entre intervenções e o posto de entrega de madeira	125
Maximização das Distâncias entre as Intervenções.....	125
Minimização das Variações das Distâncias entre as Intervenções	126
Maximização do VPL com penalidades pela distância entre unidades de manejo.....	126
Restrição de Adjacência	126
Avaliação da Dispersão das Intervenções nas Unidades de Manejo	127
RESULTADOS	128
DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
CONCLUSÕES GERAIS	145

RESUMO

BINOTI, Daniel Henrique Breda, Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010.
Estratégias de regulação de florestas equiâneas com vistas ao manejo da paisagem. Orientador: Helio Garcia Leite. Co-orientadores: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro e José Marinaldo Gleriani.

Objetivou-se no presente trabalho apresentar alternativas de formulação de modelos de regulação florestal, com a inclusão de características ambientais e sociais visando o manejo da paisagem. Os modelos foram construídos para uma fazenda modelo com área de efetivo plantio de 3.491 ha, dividida em 135 unidades de manejo. Os modelos de regulação foram formulados conforme modelo I, incluindo restrições de inteireza para as unidades de manejo. Utilizou-se a meta-heurística algoritmo genético para a solução dos modelos. As alternativas de formulação propostas foram: (i) formulação clássica de um modelo de regulação; (ii) aplicação de restrições de adjacência; (iii) restrição de classes de idades por compartimento; (iv) minimização do índice de área de colheita (IAC); (v) maximização do valor presente líquido global (VPL), com a aplicação de penalidades em função do IAC; (vi) minimização das variações das distâncias entre unidades de manejo com intervenção de colheita e o ponto de entrega da produção; (vii) maximização do valor presente líquido (VPL), com a aplicação de permissão da variação da distância (de 5, 10, 15 e 20 %) entre as unidades de manejo com intervenção de colheita e o ponto de entrega da produção; (viii) minimização da variação da distância entre as unidades de manejo com intervenções de colheita; (ix) maximização do valor presente líquido (VPL), com permissão da variação da distância (de 5, 10, 15 e 20 %) entre as unidades de manejo com intervenção de colheita; e (x) maximização a distância entre as unidades de manejo com intervenção de colhei-

ta. As alternativas de regulação foram avaliadas em função do IAC e do VPL. A aplicação da técnica de algoritmo genético foi eficiente para a solução de modelos, construídos com restrições e objetivos de caráter socioeconômico e ambiental. A comparação da variação volumétrica satisfaz à demanda de produção imposta em todos os modelos propostos. As inclusões de objetivos de caráter social e ambiental acarretaram redução no valor presente líquido global em todos os modelos testados, quando comparado com alternativas clássicas de regulação. A proposta da minimização do IAC apresentou-se econômica e ambientalmente mais satisfatória que a imposição de restrições de adjacência, bem como uma redução significativa no número de restrições. A aplicação de penalidades do IAC acima de 20 %, sobre a maximização do VPL, resultou em valores de IAC melhores do que o modelo de adjacência e valores de VPL superiores, sendo estes preferidos aos modelos com restrições de adjacência. A regularização da distância entre as unidades de manejo em situação de corte e o posto de entrega da madeira, tende a pulverizar a colheita, distribuindo-a por toda a floresta. A maximização das distâncias entre as unidades de manejo com intervenção apresentou uma melhoria no valor do IAC e uma redução de até 8% do VPL, quando comparada com o modelo clássico.

ABSTRACT

BINOTI, Daniel Henrique Breda, Universidade Federal de Viçosa, July of 2010.
Regulatory strategies for even-aged forest with views of the landscape management. Adviser: Helio Garcia Leite. Co-Advisers: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro and José Marinaldo Gleriani.

The objective of the present work is to present alternative formulations of models of forest regulation, with the inclusion of environmental and social characteristics in order to landscape management. The models were constructed for a model farm with an area of effective planting of 3491 ha, divided into 135 management units. The regulation models were formulated as model I, including integer constraints for the management units. We used a meta-heuristic genetic algorithm for solving the models. The alternative proposals were formulated: (i) classical formulation of a model of regulation, (ii) application of adjacency constraints, (iii) the restriction of age classes per compartment, (iv) minimizing the index of harvester area (IHA), (v) maximizing the overall net present value (NPV), with the application of penalties depending on the IHA, (vi) minimization of the variations of distance between management units in the presence of collection and delivery point of production, (vii) maximizing the net present value (NPV), with the application of permitted variation in the distance (5, 10, 15 and 20%) between the management units in the presence of collection and delivery point of production, (viii) minimization varying the distance between the units of management with harvesting operations, (ix) maximizing the net present value (NPV), with permission of the variation of the distance (5, 10, 15 and 20%) between the management units with intervention harvest, and (x) maximizing the distance between management units in the presence of harvest. The regulatory alter-

natives have been assessed against the IHA and the NPV. The application of genetic algorithm technique was efficient for the solution of models built with constraints and goals socioeconomic and environmental character. A comparison of volume variation to satisfy the demand of production imposed on all models. The inclusions of goals in social and environmental reduction resulted in overall net present value in all models tested, compared with conventional alternatives of regulation. The proposal of reducing the IHA presented itself economically and environmentally more satisfactory than imposing adjacency restrictions, and a significant reduction in the number of constraints. The imposition of penalties of IHA above 20% on the maximization of NPV resulted in values of IHA better than the adjacency model and higher values of NPV, which are preferred to models with adjacency constraints. The adjustment of the distance between management units in a position to harvest and post delivery of the wood tends to spray the crop by distributing it throughout the forest. Maximizing the distance between management units with the intervention showed an improvement in the value of the IHA and a reduction of up to 8% of the NPV, compared with the classical model.

INTRODUÇÃO

Manejo florestal é a arte e ciência da tomada de decisões considerando a organização, uso e conservação da floresta e dos recursos relacionados. As florestas podem ser manejadas para a produção de madeira, água, manutenção da vida silvestre, recreação ou uma combinação desses (Boungiorno e Guilles, 2003).

O Manejo florestal envolve muitas variáveis. Algumas são biológicas, como o potencial de produção de determinada espécie ou clone em determinado solo ou tipo de topografia, outras são econômicas, como o preço da madeira ou o custo de produção e algumas são sociais, como leis e impostos que incidem sobre a produção (Boungiorno e Guilles, 2003; Davis et al., 2005; Bettinger et al., 2009) e mão de obra empregada nas fases do processo produtivo (Rodrigues, 2002; Bettinger et al., 2009). A paisagem oriunda do manejo florestal é influenciada por essas variáveis e por eventos naturais como incêndios (Baskent e Jordan, 1995; Bettinger et al., 2009) e pelo manejo da fauna (Boston e Bettinger, 2001).

Nas últimas décadas, o interesse dos órgãos públicos e não-governamentais sobre os impactos das operações florestais sobre a poluição das águas, erosão, paisagem e biodiversidade tem aumentado de maneira significativa. Como resultado, a sociedade se defronta com complexos problemas que dependem de valores sociais e retornos econômicos da produção de madeira (Baskent e Keles, 2005). A consideração de fatores ambientais e ecológicos em modelos de regulação só é possível com o conhecimento da estrutura espacial da floresta (Church et al., 1998; Church et al., 2000; Baskent, 2001; Kurttila, 2001; Malchow-Moller et al., 2004; Bettinger et al., 2009). Devido à enorme complexidade e quantidade de variáveis envolvidas nesses modelos, diversas ferramentas da pesquisa operacional foram introduzidas na área

florestal, possibilitando a redução de riscos e incertezas na tomada de decisão (Rodrigues, 2001). Dentre as ferramentas com aplicação no manejo dos recursos florestais estão: Programação Linear (PL), Programação Inteira (PI), Programação Não-linear (PNL), Programação Multiobjetivo (PMO) e Programação Dinâmica (PD) (Boungiorno e Guilles, 2003; Davis et al., 2005; Bettinger et al., 2009).

A PL se destaca em especial nas aplicações de ordenamento e otimização da produção florestal (Rodrigues, 1997; Boungiorno e Guilles, 2003; Davis et al., 2005; Castro, 2007). Apesar desse predomínio do emprego da PL, a necessidade de incorporação de objetivos ambientais nos modelos de regulação florestal tem levado à necessidade de se manterem intactas as unidades de manejo, limitando a sua utilização. Por isso, modelos de programação Inteira (PI) utilizando algoritmos exatos (*Branch and bound*) e heurísticas (algoritmos genéticos, *busca tabu*, *simulated annealing*), tem sido cada vez mais empregados para solução de problemas de gerenciamento de recursos florestais (Boungiorno e Guilles, 2003; Rodrigues, 2003, 2004a, 2004b; Davis et al., 2005; Bettinger et al., 2009). Todavia, essas técnicas apresentam certas desvantagens, entre elas a longa demora de processamento e a incerteza da obtenção da solução ótima.

Técnicas analíticas geralmente são adaptáveis às metas espaciais e temporais do manejo florestal, desde a tradicional programação matemática até as técnicas heurísticas. As principais limitações relatadas em técnicas tradicionais de programação matemática considerando variáveis inteiras são: a inviabilidade de formulação de complexos problemas com relações lineares; a inviabilidade de resolução de problemas em um tempo razoável; e a limitação de variáveis e constantes que podem ser incluídas no problema. Por outro lado, as principais limitações das heurísticas são: o tempo necessário para o desenvolvimento e aplicação para cada específico problema de planejamento; e a incapacidade de garantir que a solução ótima possa ser encontrada (Gadow e Pukkala, 2008). A grande vantagem da utilização de técnicas tradicionais de programação matemática é que quando a solução é gerada, ela é necessariamente ótima. A principal vantagem da utilização de técnicas heurísticas é que elas podem gerar rapidamente varias soluções para problemas complexos (Gadow e Pukkala, 2008; Bettinger et al., 2009).

Diversos estudos sobre regulação da produção de florestas equianêas já foram conduzidos (Rodrigues, 1997, 2001; Moreira, 2008), empregando diferentes enfoques para modelagem e resolução de modelos. Entretanto ainda há uma certa

carência de estudos e exemplos de modelos matemáticos de regulação com inclusão de componentes ambientais e sociais. Da mesma forma, apesar dos inúmeros estudos já divulgados, algumas técnicas de análise ainda não foram devidamente testadas. Por isso foi conduzido este estudo cujo objetivo foi a avaliação de algumas estratégias de modelagem e análise de problemas de regulação com vistas ao manejo da paisagem.

A dissertação foi dividida em cinco capítulos. Inicialmente, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais temas abordados no estudo. No segundo capítulo é apresentado um modelo de regulação florestal com restrições de adjacência e no terceiro, uma formulação alternativa de regulação por compartimento. No quarto capítulo são apresentadas modelagens baseadas no Índice de Área de Colheita (IAC). No quinto capítulo são apresentadas alternativas de modelagem considerando as distâncias entre as unidades de manejo com atividades de colheita e quanto a dispersão das frentes de colheita em relação ao ponto de entrega da madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Characterising spatial structure of forest landscape. **Canadian Journal of Forest Research**, v.25, p.1830-1849, 1995.
- Baskent, E. Z. Combinatorial optimization in forest ecosystem management modeling. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 25, p. 187–194, 2001.
- Baskent, E. Z.; Keles, S. Spatial Forest Planning: A review. **Ecological Modelling**, v.188, p. 145-173, 2005.
- Bettinger, P.; Boston, K.; Siry, L. P.; Grebner, R. L. **Forest Management and Planning**. Elsevier. 2009. 331p.
- Boston, K.; Bettinger, P. The economic impact of green-up constraints in the southeastern United States. **Forest Ecology and Management**, v.145, p. 191-202, 2001.
- Buongiorno, J.; Gilles, J. K. **Decision methods for forest resource management**. San Diego, CA: Academic Press. 2003. 439p.
- Castro, R. R. **Regulação de Florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- Church, R. L.; Murray, A. T.; Weintraub, A. Locational issues in forest management. **Location Science** v.6, p.137–153, 1998.
- Church, R. L.; Murray, A. T.; Figueroa, M. A.; Barber, K. H. Support System Development for Forest Ecosystem Management. **European Journal of Operational Research**, v.121, p. 247-258, 2000.

Davis, L. S.; Johnson, K. N.; Bettinger, P.; Howard, T. E. **Forest Management: to Sustain Ecological, Economic, and Social Values**. McGraw-Hill Companies Inc, 2005. p. 804.

Gadow, K.v., Pukkala, T. (Eds), **Designing Green Landscapes**. Springer series "Managing. Forest Ecosystems" v.15. 2008.

Kurttila, M. The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning—a landscape ecological perspective. **Forest Ecology and Management**, v.142(1-3), p. 129-142, 2001.

Malchow-Moller, N., Strange, N., Thorsen, B.J. Real-options aspects of adjacency constraints. **Forest Policy Economic**, n.6, p. 261–270, 2004.

Moreira, J. M. M. A. P. **A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais**. 2008. 123f. Dissertação (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2008.

Rodrigues, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 2001. 225f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.

Rodrigues, F. L. **Regulação de florestas equiâneas utilizando programação linear**. 1997. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L. Soluções de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando busca tabu. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.5, p.701-713, 2003.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Ribeiro, C. A. A. S. Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.2, p.247-256, 2004a.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Silva, G. F. Metaheurística algoritmo genetic para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.22, n.2, p.233-245, 2004b.

CAPÍTULO 1

REGULAÇÃO FLORESTAL: ENFOQUES E TÉCNICAS ANALÍTICAS

O gerenciamento dos recursos florestais envolve planejamento em longo (estratégico), médio (tático) e curto prazo (operacional), sempre com o propósito de maximizar os benefícios produzidos pela floresta. Esse gerenciamento, ou manejo florestal, envolve objetivos conflitantes relativos ao uso e aos produtos florestais, interesses sociais, políticos, e ambientais da sociedade.

Modelos de planejamento estratégico geralmente contemplam vários anos e, por isso, são chamados de planejamento de longo prazo. Esses modelos possuem várias restrições no que diz respeito à produção e ao uso sustentável dos recursos naturais, sendo uma abstração do problema de planejamento florestal que pode ser resolvida por meio de métodos numéricos, considerando simultaneamente todas as unidades de manejo da floresta.

A implementação de um modelo de planejamento estratégico consiste em determinar diferentes prescrições silviculturais, para cada unidade de manejo, que serão avaliadas pelos métodos matemáticos visando escolher o melhor plano de manejo. Os métodos numéricos são usados para a alocação ótima dos recursos escassos. Esses métodos pertencem a pesquisa operacional, sendo que os principais métodos utilizados para a resolução dos modelos de planejamento florestal destacam-se a: programação linear (PL), programação multiobjetivo (PMO), programação inteira (PI), programação inteira mista (PIM), programação dinâmica (PD), meta-heurísticas e

simulação. A técnica de otimização empregada depende da formulação do modelo e das características da floresta.

O crescente interesse em aspectos ecológicos no manejo florestal trouxe uma ampla gama de objetivos, muitas das quais estão relacionadas com as posições relativas dos tratamentos ou com as características da floresta. Essa situação adicionou uma complexidade ainda maior aos modelos de planejamento (Weintraub et al., 2000).

A incorporação de características espaciais aos modelos de planejamento florestal é necessária para uma melhor fidelidade às características socioambientais que influenciam a tomada de decisão (Jorgensen, 2000; Bettinger et al., 2007), sendo que a imposição dessas características muitas vezes exige a utilização de variáveis discretas nos modelos.

Métodos Matemáticos

A resolução dos modelos de planejamento florestal por métodos numéricos ocorre da seguinte forma: dado um conjunto S de variáveis s e uma função objetivo $f: S \leftarrow \mathbb{R}$, que associa cada solução s existente no conjunto de soluções viáveis a um valor real $f(s)$, encontre a solução s^* , dita ótima, para a qual $f(s)$ tem o valor mais favorável.

Existem duas principais formas de resolução de problemas de otimização, que podem ser denominados de métodos exatos e heurísticos.

Métodos Exatos

Dentre os métodos exatos mais comumente usados destaca-se a programação linear. Apesar de a sua origem datar de 60 anos atrás, um dos primeiros relatos descrevendo o potencial da programação linear no manejo de recursos naturais é datado de 1962 (Bettinger et al., 2009).

Como definição a PL trata da alocação de recursos limitados em atividades competitivas de maneira ótima (Hillier e Lieberman, 2006; Taha, 2007). Essa defini-

ção descreve bem a situação encontrada no manejo florestal. Os recursos existentes como terra, mão-de-obra, produção volumétrica, tempo e dinheiro são escassos. Grande parte dos projetos desenvolvidos na empresa são concorrentes, como exemplo o critério de manejo após o corte raso da primeira rotação pode ser o plantio do talhão com outra espécie madeireira, ou a regeneração do mesmo por condução da brotação (Boungiorno e Guilles, 2003).

As aplicações da PL no planejamento florestal têm como finalidade primordial auxiliar os gestores na tomada de decisões considerando as diversas restrições que influenciam na produção florestal. Essa técnica não somente demonstra quais alternativas podem ser executadas (viáveis), mas elege uma solução como ótima (Boungiorno e Guilles, 2003).

O método mais usado para a solução de modelos de PL é o método *simplex* desenvolvido por George Dantzig em 1947. O grande sucesso da PL deve-se em parte pela eficiência demonstrada pelo *simplex* na resolução de problemas de grande porte, sendo que computadores pessoais podem encontrar soluções ótimas para problemas com centenas de milhares de variáveis em questão de segundos (Bettinger, et al., 2009).

A formulação padrão dos modelos de programação linear pode ser descrito como a maximização (1) ou minimização (2) de uma função objetivo linear alterando suas variáveis de decisão X_1, X_2, \dots, X_n , sujeito a equações e ou inequações lineares formadas pelas variáveis de decisão.

1- Maximização

$$\text{MAX } Z = \sum_{i=1}^m C_i X_i$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m A_i X_i \leq B_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m X_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

2- Minimização

$$\text{MIN } Z = \sum_{i=1}^m C_i X_i$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m A_i X_i \geq B_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m X_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

em que Z é o valor da função objetivo, C_i é o coeficiente de custo associado à i -ésima variável de decisão, A_i coeficiente tecnológico associado a i -ésima variável de decisão e B_i nível da restrição i .

As variáveis e equações dos modelos de PL são guiadas por quatro pressuposições básicas (Bettinger e Kim, 2008):

- 1- *proporcionalidade* - a contribuição de cada produto no resultado da função objetivo, ou em uma restrição, é proporcional ao número de unidades produzidas.
- 2- *aditividade* – cada variável de decisão existente na função objetivo ou em uma constante contribui independentemente para a função objetivo ou restrição.
- 3- *divisibilidade* – as variáveis de decisão são contínuas, e
- 4- *exatidão* – os coeficientes associados a cada variável de decisão devem ser conhecidos.

Na modelagem via PL é assumido que as variáveis de decisão assumem valores reais contínuos. Entretanto, algumas características dos problemas de planejamento florestal podem implicar na necessidade de incluir variáveis discretas. Quando todas as variáveis envolvidas são inteiras ou binárias o modelo passa a ser chamado de problema de programação inteira (PI), se apenas algumas variáveis apresentam características discretas o modelo é definido como sendo de programação inteira mista (PIM).

A formulação dos modelos de PI e PIM apresentam características similares à formulação dos modelos de PL. A principal diferença é a incorporação de restrições que exigem que determinadas variáveis assumam valores inteiros (0, 1, 2, 3,...) ou valores binários (0 ou 1).

Entre os vários métodos que são usados para a solução de modelos de PI ou PIM são o métodos de *branch and bound* e o *cutting plane* (Bettinger et al., 2009).

Soluções Heurísticas

Programação linear, programação inteira e programação inteira mista são considerados métodos tradicionais de programação matemática, que auxiliam no desenvolvimento de uma solução global ótima para o problema de planejamento flo-

restal. Estes métodos provaram ter um valor inestimável para a resolução de problemas de manejo florestal. Entretanto essas abordagens nem sempre funcionam com problemas reais. Alguns problemas (e suas modelagens correspondentes) apresentam tamanha complexidade que pode ser impossível encontrar uma solução ótima. Em tais situações uma boa solução viável pode ser obtida pela aplicação de técnicas heurísticas (Hillier e Lieberman, 2008).

Um método heurístico é um método que apresenta grande possibilidade de encontrar uma excelente solução viável, não necessariamente a solução ótima, para o problema em questão. Apesar de não se poder afirmar sobre a qualidade da solução obtida, um método heurístico bem elaborado geralmente é capaz de apresentar uma solução próxima da ótima ou concluir pela inexistência de uma solução viável (Hillier e Lieberman, 2008).

As idéias implementadas nos métodos heurísticos são geralmente simples e adaptadas para a solução de um modelo específico. A evolução das idéias heurísticas resultou no desenvolvimento de poderosas meta-heurísticas. Uma meta-heurística é um conjunto de diretrizes e estratégias gerais para o desenvolvimento de um método de busca específico para a solução em um tipo de problema em particular (Hillier e Lieberman, 2008).

As meta-heurísticas apresentam-se como algoritmos iterativos completos onde cada iteração envolve a busca de uma solução que poderia ser melhor que a melhor solução existente previamente. Dentre as principais vantagens das meta-heurísticas destacam-se: a incorporação de relações que não são facilmente traduzidas em relações lineares ou não – lineares (algumas restrições e equações são facilmente implementadas utilizando lógica (*If-then-else*, *For-next*, *Loop*)) e a solução de problemas complexos pode ser encontrada rapidamente.

Como desvantagens das meta-heurísticas pode-se destacar o tempo gasto para a implementação da técnica, a dificuldade de localização de programas disponíveis, e a dificuldade de calibração da técnica para o problema em questão (Bettinger, et al., 2009).

As principais meta-heurísticas utilizadas para o uso no manejo de recursos naturais são Simulação de Monte Carlo, *simulated annealing*, *threshold accepting*, busca tabu, e algoritmos genéticos (Bettinger, et al., 2009). Dentre as meta-heurísticas a utilização dos algoritmos genéticos apresenta grande desempenho em diversas aplicações (Gen e Cheng, 2000; Rodrigues, 2001; Hillier e Lieberman, 2006).

Algoritmos Genéticos

O termo algoritmo genético normalmente abreviado por GA ou AG, foi usado inicialmente por John Holland, em 1975, em seu livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Holland descreveu processos evolutivos e apresentou os AG com uma metáfora para estudo da adaptação e evolução do mundo real (Linden, 2008). A popularização dos algoritmos genéticos se deu com um de seus estudantes, David Goldberg, com a solução de um complexo problema envolvendo o controle de gases em oleodutos (Goldberg, 1989).

Algoritmos genéticos são um ramo dos algoritmos evolucionários que se baseiam nos princípios da evolução natural, para encontrar uma ótima solução para um problema de otimização ou outras aplicações (Sivanandam e Deepa, 2008). Um conjunto de soluções compõe a população. A população sofre um processo chamado de reprodução, pelo qual a população atual é transformada em uma nova população. Essa transformação ocorre por meio de seleção, recombinação (*crossover*) e mutação (Reeves e Rowe, 2002). Essas transformações dependem da qualidade de cada indivíduo como solução do problema em questão chamada avaliação (aptidão ou *fitness*) e vão gerar um processo evolutivo, que eventualmente deverá encontrar uma boa solução (talvez a solução ótima), para o problema em questão (Linden, 2008).

Como os AG são altamente inspirados na teoria evolutiva, há uma analogia muito grande entre os termos biológicos e os termos do AG. Um indivíduo ou cromossomo representa uma solução para o problema em questão. Os cromossomos são formados por genes, que se situam em um determinado loco e podem apresentar diferentes alelos. Uma solução possui diferentes características, que se situam em posições distintas e podem assumir valores os quais, dependem da codificação do problema (Linden, 2008). O AG trabalha simultaneamente com um conjunto de indivíduos (população), o que simboliza um conjunto de soluções. O *fitness* ou a função de aptidão representa o valor da função objetivo ou avaliação expressa pelo indivíduo (Rodrigues, 2001). A estrutura geral do algoritmo é apresentada na figura 1.1.

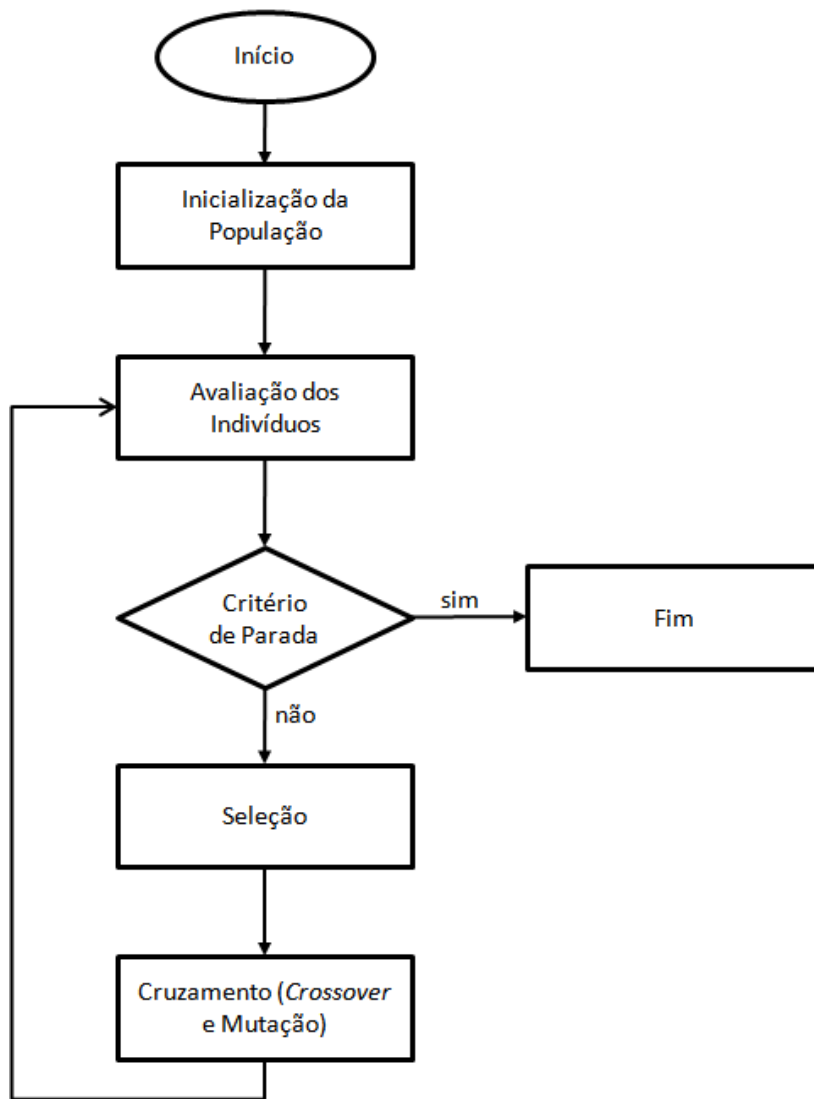


Figura 1.1: Esquema geral do algoritmo genético implementado.

Os AG caracterizam-se por usarem técnicas probabilísticas. Assim sendo com a mesma população inicial e o mesmo conjunto de parâmetros pode se encontrar diferentes soluções a cada vez que este é executado (Linden, 2008). Contudo, o algoritmo não realiza uma caminhada aleatória pelo espaço de soluções, mas sim direcionada pelos processos de seleção.

Segundo Haupt e Haupt (2004), as principais vantagens da utilização do AG são:

- Possibilidade de otimização de variáveis discretas e contínuas;
- Buscam simultaneamente em diferentes locais da superfície de busca;
- Trabalha simultaneamente com um grande número de variáveis;
- Paralela, pois apresentam um conjunto de soluções que são avaliadas simultaneamente;

- Não utilizam somente informações locais, logo são extremamente adequadas para funções de perfis complexos, pois não necessariamente ficam presos em mínimos ou máximos locais;
- Geram como resultado uma lista de soluções e não simplesmente uma única solução;
- Podem não trabalhar com as variáveis propriamente dita, e sim com uma codificação destas;
- Não são completamente aleatórias.

Essas vantagens são intrigantes e produzem resultados impressionantes quando aplicados em problemas onde métodos tradicionais falham (Haupt e Haupt, 2004).

Segundo Linden (2008) AG pode ser resumido algoritmicamente como:

1. Geração da população inicial de cromossomos;
2. Avaliação completa da população;
3. Seleção de indivíduos na população para a geração de novos indivíduos da população;
4. Aplicação de operadores genéticos (recombinação e mutação), para a formação de uma nova população;
5. Exclusão de indivíduos da velha população em função de algum critério;
6. Avaliação dos novos indivíduos e inserção na população;
7. Se o critério de parada foi satisfeito, então parar corrida do algoritmo caso contrário voltar para o 3º passo.

A população inicial geralmente é criada aleatoriamente, de forma independente para cada indivíduo. A distribuição aleatória sugere que a população inicial cobre todo o espaço de soluções, mas isso não é garantido visto o tamanho finito da população (Linden, 2008).

Para os modelos de regulação florestal, Rodrigues (2001), implementou a geração da população inicial respeitando a restrição de singularidade, ou seja, em cada gene a escolha dos alelos considerava as demais opções escolhidas para a mesma unidade de manejo. Essa metodologia facilita a evolução do algoritmo visto que, soluções que certamente seriam inviáveis (exemplo: duas prescrições para a mesma UM) não seriam geradas.

A função de avaliação ou aptidão ou *fitness* determina a qualidade do indivíduo para a solução do problema em questão. É comum que esta avaliação seja calcu-

lada através da função objetivo, que depende diretamente das especificações do problema (Michalewicz, 1996).

Indivíduos que não atendem as restrições impostas pelo problema em questão podem ser excluídos da população ou sofrerem penalidades em função das restrições impostas, diminuindo o valor obtido por suas funções de avaliação (Rodrigues, 2001). A formulação básica da aplicação de penalidades em um modelo de regulação florestal com restrições volumétricas e com o objetivo de maximizar o Valor Presente Líquido global é:

$$\text{Max. fitness} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \alpha \left(H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \right)^2$$

em que, H_k = demanda volumétrica (m^3), no k -ésimo período do horizonte de planejamento; α é o coeficiente de penalidade associado a restrição volumétrica restrição; x_{ij} são variáveis de decisão, representando a j -ésima alternativa de manejo adotada na i -ésima unidade de manejo; c_{ij} é Valor Presente Líquido de cada unidade de manejo i , manejada segundo a alternativa de manejo j ; m é o número total de unidades de manejo; n é número total de alternativas de manejo para a i -ésima unidade de manejo; V_{ijk} é o volume (m^3) produzido, no período k , pela i -ésima unidade de manejo adotando-se a j -ésima alternativa de manejo ou prescrição.

O método de seleção de indivíduos para cruzamento deve simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies, onde indivíduos mais aptos têm maiores chances de gerar descendentes (Linden, 2008). Dentre os métodos de seleção comumente usados destaca-se o método da *roleta russa* e o *elitismo* (Rodrigues, 2001).

Os operadores genéticos (recombinação e mutação) são os mecanismos responsáveis pela evolução do AG. A recombinação também conhecida como *crossover* ou cruzamento, é o operador responsável pela reprodução do AG. Há dois métodos principais de aplicação do *crossover*: de um único ponto e de múltiplos pontos. A mutação tem por função preservar a diversidade existente na população (Chambers, 2001; Linden, 2008).

Planejamento Florestal e Otimização

O planejamento da seqüência de plantio e colheita é apenas uma dentre as inúmeras tarefas que devem ser realizadas por equipes de planejamento florestal, porém, é essencial para o sucesso de empreendimentos florestais (Boungiorno e Guilles, 2003). Esta atividade apresenta uma enorme complexidade por abranger desde aspectos relacionados ao crescimento das árvores até aspectos sociais amplos, passando por aspectos dos ecossistemas, biologia das espécies, sistemas de colheita, dinâmica da paisagem, modelos de crescimento e produção, situação econômica do mercado, modelos de otimização, classificação de qualidade de local e matemática aplicada (Boungiorno e Guilles, 2003; Davis et al., 2005; Bettinger et al., 2009).

O início do planejamento florestal, consiste no recolhimento das informações necessárias para a construção do modelo. Estas informações devem descrever com fidelidade as características da floresta, como o potencial de produção, disponibilidade de terra, produtos desejados e os principais objetivos aos quais se destina a floresta. O sucesso dos modelos de planejamento depende da precisão com a qual o modelo representa as metas e expectativas do silvicultor e as relações entre diferentes *inputs* e *outputs* da floresta (Pukkala, 2002). Essas metas incluem objetivos que demandam consideração de todos os talhões e características do empreendimento florestal simultaneamente, tornando o problema difícil de solucionar (Heinonen, 2007).

Um problema clássico de planejamento florestal é conhecido como *regulação florestal* (Clutter et al., 1983). A regulação da produção florestal consiste na obtenção anual ou periódica regular de produtos da floresta em igual volume, tamanho e qualidade (Leuschner, 1990). A principal meta da regulação florestal é a obtenção de uma produção sustentável. A sustentabilidade da produção não se limita a madeira, mas sim a qualquer produto da floresta ou grupo de produtos (Leuschner, 1990).

A regulação não espacial pressupõe que os tratamentos silviculturais realizados em um talhão não interferem nos talhões adjacentes. Modelos sem características espaciais são eficientemente solucionados por técnicas de programação linear (Heinonen, 2007; Bettinger et al., 2009). Johnson e Scheurman (1977) classificaram as diversas aplicações da PL utilizadas na construção de modelos de regulação florestal em dois tipos básicos conhecidos como *modelo I* e *modelo II*.

O modelo I utiliza variáveis de decisão que descrevem as ações para cada unidade de manejo (ou parte da unidade), ao longo de todo o horizonte de planejamento. A formulação básica é maximizar $Z = \sum_i \sum_j C_{ij} X_{ij}$, sujeito a $\sum_j X_{ij} = A_i$ e

minimizar $Z = \sum_i \sum_j C_{ij} X_{ij}$, sujeito a $\sum_j X_{ij} = A_i$, onde $Z =$ Função objetivo a ser minimizada ou maximizada, $C_{ij} =$ A contribuição da unidade manejo i e prescrição j para o valor da função objetivo, $X_{ij} =$ Área da unidade de manejo i atribuída a prescrição j , e $A_i =$ Área total da unidade de manejo i .

O primeiro passo para implementação do Modelo I é a determinação do horizonte de planejamento e das possíveis rotações de corte. A rotação de corte é o período de tempo desde o estabelecimento do povoamento até o seu corte raso e o horizonte de planejamento (HP) é definido como a quantidade de anos no qual um projeto é realizado. Com relação aos modelos de regulação, o HP é igual ao período de transição mais o início do período regulado, sendo para florestas equianêas entre 1 e $\frac{1}{2}$ ou 2 rotações, esse período é considerado suficiente para a construção de uma estrutura regulada pelo método de controle pela área (Leuchner, 1990).

A identificação da função a ser maximizada ou minimizada na função objetivo depende de diversos fatores, dentre eles fatores econômicos, técnicos, financeiros, sociais e ambientais, sendo esta uma tarefa complexa da equipe de planejamento. Dentre as principais metas utilizadas pela equipe de planejamento destaca-se maximização do valor presente líquido; minimização do custo total, minimização do custo unitário da produção, maximização da produtividade, ou maximização da renda anual equivalente. A função objetivo será, então, composta pelo somatório do produto entre a área de corte da unidade de manejo assinalada a influencia que cada prescrição exerce na função a ser otimizada.

No modelo II unidades de manejo cortadas em um determinado período de planejamento são agrupadas formando uma nova unidade de manejo. Neste processo a identificação das unidades de manejo é perdida, sendo uma nova identificação atribuída após a junção com outras unidades de manejos ou partes cortadas no mesmo período (Leuchner, 1990). Nesse tipo de formulação analisa as classes de idade e as alternativas de cada classe durante a rotação atual.

Otimização Espacial

A inclusão de aspectos espaciais em modelos de regulação é importante quando características ambientais e sociais são consideradas nos modelos de regula-

ção. Neste caso, a localização e as interações entre os talhões são integradas no modelo de regulação, sendo a disposição dos talhões considerada durante a otimização (Heinonen, 2007). A consideração das interações espaciais é obtida, na maioria dos modelos, por meio de restrições (Bettinger et al., 2009).

A realização de atividades silviculturais em uma unidade de manejo pode influenciar as unidades de manejo adjacentes. Por exemplo, a colheita de uma unidade de manejo pode expor os talhões vizinhos a danos causados por vento, problemas de drenagem e erosão (Church et al., 1998; Baskent e Keles, 2005). Portanto, dentre os objetivos para a inclusão de restrições espaciais nos modelos de regulação pode-se destacar a redução da abertura de extensas áreas de corte, a manutenção de corredores ecológicos entre fragmentos de floresta nativa, a redução do assoreamento de rios, a proteção da fauna e o manejo da paisagem (Baskent e Keles, 2005).

Quando características espaciais são incluídas nos modelos de regulação, as variáveis que representam as unidades de manejo deixam de ser contínuas e passam a apresentar características de variáveis discretas. Ou seja, cada unidade de manejo deve ser assinalada a apenas uma prescrição. Nesse caso, PI e PIM podem ser empregadas para a resolução deste tipo de problema (Hiller e Lieberman, 2006), embora, problemas reais possam apresentar enormes dimensões e alta complexidade (Murray e Church, 1995; Bettinger et al., 1999), dificultando a obtenção de uma solução satisfatória.

Dois principais formas de resolução de modelos de regulação com variáveis inteiras podem ser empregadas: primeira é a utilização de algoritmos exatos de programação inteira (Kirby, 1980; Covington et al., 1988; Jones et al., 1991; Hof e Joyce, 1992; Hof e Joyce, 1993; Hof et al., 1994; Murray e Church, 1995b; Snyder e ReVelle, 1996; Snyder e ReVelle, 1997; Bevers e Hof, 1999; McDill e Braze, 2000, 2001; Alonso, 2003; Rodrigues, 2001 e Castro, 2007). Uma segunda forma consiste na aplicação de heurísticas ou técnicas de simulação (Baskent e Jordan, 1991; Bare e Mendoza, 1992; Aarts e Lenstra, 1997; Wang e Zhang, 2001; Baskent e Jordan, 2002; Rodrigues et al., 2003; Rodrigues et al., 2004a, 2004b; Bettinger et al., 2007).

O emprego de técnicas heurísticas possibilita a incorporação de características não lineares na formulação das restrições e da função objetivo. Além disso, quando as heurísticas são utilizadas para solução de modelos multi-objetivos, o componente espacial pode ser incluído na função objetivo, por meio de funções de penalidade (Baskent e Jordan, 2002; Öhman e Eriksson, 2002).

As técnicas heurísticas mais utilizadas em modelos de regulação florestal são *simulated annealing* (Lockwood e Moore, 1993; Baskent e Jordan, 2002; Rodrigues, 2004), Busca tabu (Bettinger et al., 1997; Richards e Gunn, 2003; Rodrigues, 2004) algoritmos genéticos (Bettinger et al., 2002; Rodrigues, 2004; Pukkala e Kurttila, 2005) e RazãoR (Nobre e Rodriguez, 2005).

Restrições de Adjacência

O emprego de restrições de adjacência é uma das alternativas para implementar restrições socioambientais em modelos de regulação florestal (Alonso, 2003; Castro, 2007). Estas restrições buscam minimizar os impactos ambientais gerados pela destruição dos habitats naturais, evitando o corte de áreas adjacentes ou de áreas contíguas extensas, visando prover abrigo e alimento às populações que vivem nas florestas manejadas, com o intuito de aliar conservação e produção nas áreas florestais, bem como mitigar os impactos visuais causados pela atividade de colheita (Castro, 2007; Moreira, 2008). A incorporação destas restrições pode ocorrer de duas maneiras distintas: *Modelos Restritos por Área* (MRA) e *Modelos Restritos por Unidade* (MRU) e (Baskent e Jordan, 1995; Murray, 1999; Murray e Snyder, 2000; Crowe et al., 2003).

Os MRA consideram que áreas adjacentes podem ser cortadas, contudo a soma das áreas das unidades de manejo não pode ultrapassar um limite pré-definido. Os MRU consideram o tamanho da unidade de manejo suficientemente grande para impedir o corte de unidades vizinhas (Baskent e Keles, 2005). Como no Brasil as unidades de manejo são geralmente definidas antes da implantação dos povoamentos, e possuem um tamanho relativamente grande, a modelagem empregando MRU deve ser preferida. Contudo, a aplicação de tais restrições requer que a seleção de prescrições para as unidades de manejo sejam binárias. Tal fato inviabiliza, em muitos casos, a aplicação de métodos tradicionais de pesquisa operacional, sendo necessário aplicar técnicas de simulação ou heurísticas (O'Hara et al., 1989; Clements et al., 1990; Nelson e Brodie, 1990; Dahlin e Sallnas, 1993; Daust e Nelson, 1993; Murray e Church, 1995a; Snyder e ReVelle, 1996; Mullen e Butler, 1997; Brumelle et al.,

1998; Hoganson e Borges, 1998; Boston e Bettinger, 1999; Rodrigues, 2001; Bas-kent e Jordan, 2002; Crowe e Nelson, 2003).

Modelos de regulação florestal com restrições de adjacência podem demorar horas, se não dias, para serem solucionados com o método padrão de PIM, que é o *branch and bound* (McDill e Braze, 2000). Diversas formulações e algoritmos têm sido propostos para melhorar a performance computacional desse problema (Thompson et al. 1973; Meneghin et al. 1988; Yoshimoto e Brodie, 1990; Torres-Rojo e Brodie, 1990; Boston e Bettinger, 1999; Borges et al., 1999; Weintraub et al., 1994; Moreira, 2008). McDill e Braze (2000) classificaram as diversas formulações de restrições de adjacência em seis tipos, dentre eles: a formulação em pares, constante tipo I e constante tipo matriz ordinária de adjacência.

A Formação em pares foi a primeira maneira de formulação de restrições de adjacência proposta por Thompson et al. (1973). As restrições são formuladas para cada par de unidades de manejo adjacentes em todos os períodos do horizonte de planejamento. A formulação geral pode ser descrita como:

$$X_{it} + X_{jt} \leq 1 \text{ para todo } (i, j) \in Adj \text{ e } t = 1, 2, \dots, n$$

onde,

X_{it} é a variável binária associada à unidade de manejo i no período t .

X_{jt} é a variável binária associada à unidade de manejo j no período t .

Adj é o conjunto talhões adjacentes.

n número de períodos do horizonte de planejamento.

Para a formulação da restrição em apenas um período (Figura 2):

$$X_1 + X_2 \leq 1$$

$$X_2 + X_3 \leq 1$$

$$X_4 + X_5 \leq 1$$

$$X_5 + X_7 \leq 1$$

$$X_1 + X_3 \leq 1$$

$$X_2 + X_4 \leq 1$$

$$X_4 + X_6 \leq 1$$

$$X_1 + X_4 \leq 1$$

$$X_3 + X_4 \leq 1$$

$$X_5 + X_6 \leq 1$$

A formulação em pares considera apenas um talhão adjacente para a construção da restrição, em um dado período. Assim, quando um grupo de unidades de manejo são adjacentes, apenas uma destas pode ser cortado (McDill e Braze, 2000). Meneghin et al., (1988), propuseram a construção de restrições utilizando grupos de unidades de manejo, o qual reduz consideravelmente o número de restrições. Este tipo de formulação, denominada *constante tipo I*, resulta em:

$$\sum_{i \in C_j} X_{it} \leq 1$$

onde,

C_j é o conjunto de unidades de manejo adjacentes a unidade i .

A aplicação desse tipo de restrição, na Figura 1.2, resulta em:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \leq 1$$

$$X_4 + X_5 + X_6 \leq 1$$

$$X_5 + X_7 \leq 1$$

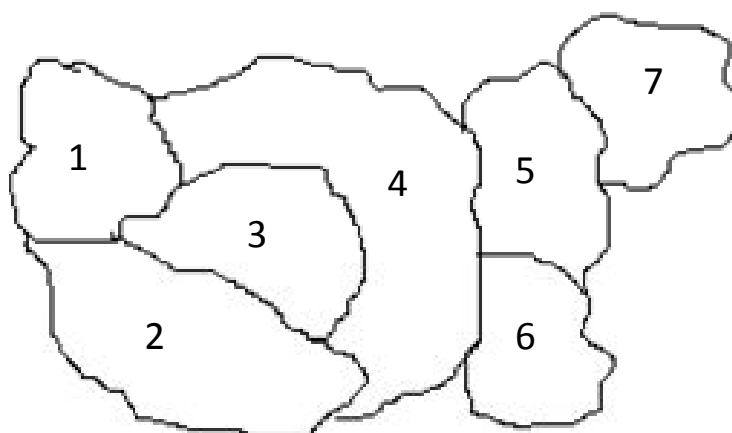


Figura 1.2: Floresta hipotética com sete unidades de manejo (McDill e Braze, 2000).

A formulação de restrições empregando a Matriz adjacente ordinária (MAO) consiste na construção de uma matriz de adjacência $M \times M$, onde M é o número de unidade de manejo; se os talhões i e j são adjacentes os elementos que compõem a matriz (X_{ij}) possuem valor não nulo (McDill e Braze, 2000). A formulação da matriz para o exemplo da Figura 1.2 apresenta a seguinte formação:

UM	1	2	3	4	5	6	7
1	-	1	1	1	0	0	0
2	1	-	1	1	0	0	0
3	1	1	-	1	0	0	0

4	1	1	1	-	1	1	0
5	0	0	0	1	-	1	1
6	0	0	0	1	1	-	0
7	0	0	0	0	1	0	-

A formulação padrão é apresentada a seguir:

$$n_i X_{it} \sum_{j \in Adj} X_{jt} \leq n_i$$

A aplicação destas restrições ao exemplo da Figura 1.2 resulta em:

$$3X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \leq 3$$

$$X_1 + 3X_2 + X_3 + X_4 \leq 3$$

$$X_1 + X_2 + 3X_3 + X_4 \leq 3$$

$$X_1 + X_2 + X_3 + 5X_4 + X_5 + X_6 \leq 5$$

$$X_4 + 3X_5 + X_6 + X_7 \leq 3$$

$$X_4 + X_5 + 2X_6 \leq 2$$

$$X_5 + X_7 \leq 1$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarts, E.; Lenstra, J. K. Introduction. In: Aarts, E., ja Lenstra, J. K. (eds.) **Local search in combinatorial optimization**. John Wiley & Sons, New York, p. 1-16. 1997.
- Alonso, L. R. L. **O problema da consideração de restrições de adjacência em um planejamento florestal**. 2003. 114f. Dissertação(Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- Bare, B. B.; Mendoza, G. A. Timber harvest scheduling in a fuzzy decision environment. **Canadian Journal of Forest Research**. v.22, p. 423 – 428, 1992.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G.A. Spatial wood supply simulation modelling. **Forestry Chronicle**, v. 67, n.6, p.610-621, 1991.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Characterising spatial structure of forest landscape. **Canadian Journal of Forest Research**, v.25, p. 1830-1849, 1995.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Forest landscape management modelling using *simulated annealing*. **Forest Ecology and Management**, v. 165, p.29-45, 2002.
- Baskent, E. Z.; Keles, S. Spatial Forest Planning: A review. **Ecological Modelling**, v.188, p. 145-173, 2005.
- Bettinger, P. , Sessions, J.; Boston, K. Using Tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game. **Ecological Modelling**, v. 94, p. 111–123, 1997.
- Bettinger, P.; Kim, Y. H. Spatial optimisation - computational methods. In **Designing Green Landscapes**, Gadow, K., and T. Pukkala (eds.). Springer, New York. p. 111-135. 2008.

- Bettinger, P.; Sessions, J.; Boston, K. Using tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game. **Ecological Modelling**, v.42, p. 111-123, 1997.
- Bettinger, P.; Boston, K.; Sessions, J. Intensifying a heuristic forest harvest scheduling search procedure with 2-opt decision choices. **Canadian Journal of Forest Research**, v.29, p. 1784–1792, 1999.
- Bettinger, P.; Graetz, D.; Boston, K.; Sessions, J.; Chung, W. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. **Silva Fennica**, v.36, p. 561–584, 2002.
- Bettinger, P.; Boston, K.; Kim, Y-H; Zhu, J. Landscape-level optimization using tabu search and stand density-related forest management prescriptions. **European Journal of Operational Research**, v. 176, p.1265–1282, 2007.
- Bettinger, P.; Boston, K.; Siry, L. P.; Grebner, R. L. **Forest Management and Planning**. Elsevier. 2009. 331p.
- Bevers, M., Hof, J. Spatially optimizing wildlife habitat edge effects in forest management linear and mixed-integer programs. **Forest Science**, v.45, n.2, p.249–258, 1999.
- Borges, J. G., Hoganson, H. M.; Rose, D. W. Combining a decomposition strategy with dynamic programming to solve spatially constrained forest management scheduling problems. **Forest Science**, v.45, p.201–212, 1999.
- Boston, K.; Bettinger, P. An analyses of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems. **Forest Science**, v.45, n.2, p. 292–301, 1999.
- Buongiorno, J.; Gilles, J. K. **Decision methods for forest resource management**. San Diego, CA: Academic Press. 2003. 439p.
- Brumelle, S.; Granot, D.; Halme, M.; Vertinsky, I. A tabu search algorithm for finding good forest harvest schedules satisfying green-up constraints. **European Journal of Operational Research**, v.106, n.2/3, p.408–424, 1998.
- Castro, R. R. **Regulação de Florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

- Chambers, L. D. **The practical handbook of genetic algorithms, applications**. 2ª edição, Chapman & Hall/CRC. 2001. 521p.
- Church, R. L.; Murray, A. T.; Weintraub, A. Locational issues in forest management. **Location Science**, v.6, p.137–153, 1998.
- Clements, S.; Dallain, P.; Jamnick, M. An operationally, spatially constrained harvest scheduling model **Canadian Journal of Forest Research**, v.20, p. 1438–1447, 1990.
- Clutter, J. L.; Fortson, J. C.; Pienaar, L. V.; Brister, G. H.; Bailey, R. L. **Timber Management – A Quantitative Approach**. Wiley. 1983.
- 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.
- Crowe, K.; Nelson, J. An indirect search algorithm for harvest scheduling under adjacency constraints. **Forest Science**, v.49, n.1, p. 1–11, 2003.
- Crowe, K.; Nelson, J.; Boyland, M. Solving the area-restricted harvest scheduling model using the branch and bound algorithm. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33, p. 1804–1814, 2003.
- Dahlin, B.; Sallnäs, O. Harvest scheduling under adjacency constraints – a case study from the Swedish sub-alpine region. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v.8, p. 281–290, 1993.
- Daust, D. K.; Nelson, J. D. Spatial reduction factors for strata-based harvest schedules. **Forest Science**, v. 39, n.1, p. 152–165, 1993.
- Davis, L. S.; Johnson, K. N.; Bettinger, P.; Howard, T. E. **Forest Management: to Sustain Ecological, Economic, and Social Values**. McGraw-Hill Companies Inc, 2005. p. 804.
- Gen, M.; Cheng, R. **Genetic Algorithm and Engineering Optimization**, John Wiley and Sons, New York, 2000.
- Goldberg, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**, Addison-Wesley. 1989.
- Haupt, R. L.; Haupt, S. E. **Practical Genetic Algorithms**. 2ª edição. John Wiley & Sons, 2004. 272p.

- Heinonen, T. **Developing spatial optimization in forest planning**. Dissertations Forestales 34f. Faculty of Forestry, University of Joensuu. 2007.
- Hiller, F. S., Lieberman, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8ª edição, McGraw-Hill, 2006. 828p.
- Hof, J.; Joyce, L. A. Spatial optimization for wildlife and timber in managed forest ecosystems. **Forest Science**, v.38, n.3, p. 489–508, 1992.
- Hof, J.; Joyce, L. A. A mixed integer linear programming approach for spatially optimizing wildlife and timber in managed forest ecosystem. **Forest Science**, v.39, n.4, p.816–834, 1993.
- Hof, J. G.; Bevers, M.; Joyce, L.; Kent, B. An integer programming approach for spatially and temporally optimizing wildlife populations. **Forest Science**, v.40, p.177-191, 1994.
- Hoganson, H. & Borges, J. Using dynamic programming and overlapping subproblems to address adjacency in large harvest scheduling problems. **Forest Science**, v.44, p.526–538, 1998.
- Johnson, K. N.; Scheurman, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives Discussion and synthesis. **Forest Science Monograph** 18. 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, n.5, p. 1283–1297, 1991.
- Jørgensen, S. E. Editorial: 25 years of ecological modelling by Ecological Modelling. **Ecological Modelling**, v.126, n.2/3, p. 95–99, 2000.
- Kirby, M. W.; Wong, P.; Hager, W. A.; Huddleston, M. E. A Guide to the Integrated Resources Planning Model. USDA Forest Service. Berkeley. CA. 1980.
- Leuschner, W. A. **Forest regulation, harvest scheduling, and planning techniques**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 281p.
- Leuschner, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley & Sons, 1984. 298p.
- Linden, R. **Algoritmos genéticos**. Uma importante ferramenta da inteligência computacional. 2ª edição. Brasport. 2008. 400p.

- Lockwood, C.; Moore, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 23, p. 468-475, 1993.
- McDill, M. E.; Braze, J. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age-class distributions. **Forest Science**, v.46, p. 423–436, 2000.
- McDill, M. E.; Braze, J. Using the branch and bound algorithm to solve forest planning problems with adjacency constraints. **Forest Science**, v.47, p. 403–418, 2001.
- Meneghin, B. J.; Kirby, M. W.; Jones, J. G. An algorithm for writing adjacency constraints efficiently in linear programming models. The 1988 Symposium on Systems, 1988.
- Michalewicz, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3th Ed. Spring, 1996. 389p.
- Moreira, J. M. M. A. P. **A incorporaç o de corredores de conectividade em problemas de otimiza o para o planejamento de florestas industriais**. Disserta o (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2008.
- Mullen, D.; Buttler, R. The design of a genetic algorithm based spatially constrained timber harvest scheduling model. 1997.
- 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.
- Murray, A. T.; Snyder, S. Spatial modeling in forest management and natural resource planning. **Forest Science**, v.46, n.2, p. 153–156, 2000.
- Murray, A. T. Spatial restrictions in harvest scheduling. **Forest Science**, v.45, n.1, p. 45–52, 1999.
- Nelson, J.; Brodie, J.D. Comparison of random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest plans. **Canadian Journal of Forest Research**, v.20, p. 934–942, 1990.
- Nobre, S. R.; Rodriguez, L. C. E. Analysis and evaluation of the R-Ratio Heuristic for forest scheduling. In: Bevers, M. Barret, T. M. **Symposium systems analysis in**

forest resources; 2003. Stevenson, Portland, USDA Forest Service, General Technical Report. p. 287-295. 2005.

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.

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

Pukkala, T.; Kurttila, M. Examining the performance of six heuristic search techniques in different forest planning problems. **Silva Fennica**, v.39, n.1, p. 67-80. 2005.

Pukkala, T. Introduction to multi-objective forest planning. In: Pukkala, T (ed.), **Multi-Objective Forest Planning**. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p.1-19. 2002.

Reeves, C. R.; Rowe, J E. **Genetic Algorithms: Principles and Perspectives**. A Guide to GA Theory. Kluwer Academic Publishers. 2002. 327p.

Richards, E. W.; Gunn, E. A. Tabu search design for difficult forest management optimization problems. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33, n.6, p.1126-1133. 2003.

Rodrigues, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 2001. 225f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Vicososa. 2001.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L. Soluções de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando busca tabu. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.5, p.701-713, 2003.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Ribeiro, C. A. A. S. Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.2, p.247-256, 2004a.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Silva, G. F. Metaheurística algoritmo genetic para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.22, n.2, p.233-245, 2004b.

Sivanandam, S. N.; Deepa, S. N. **Introduction to Genetic Algorithms**. Spring. 2008. 453p.

Snyder, S.; ReVelle, C. Temporal and spatial harvesting of irregular systems of parcels. **Canadian Journal of Forest Research**, v.26 (6), p. 1079–1088. 1996.

Snyder, S.; ReVelle, C. Dynamic selection of harvests with adjacency restrictions: the SHARe model. **Forest Science**, v.43, p. 213–222. 1997.

Taha, H. A. **Operations Research: An Introduction**. 8^a Ed. Pearson Prentice Hall. Fayetteville. 2007.

Thompson, E. F.; Halterman, B. G.; Lyon, T. J.; Miller, R. L. Integrating timber and wildlife management planning **The Forestry Chronicle**, v. 49, n. 6, p. 247-250, 1973.

Torres-Rojo, J. M.; Brodie, J.D. Adjacency constraints in harvest scheduling: an aggregation heuristic. **Canadian Journal of Forest Research**, n. 20, p. 978–986. 1990.

Wang, Y.; Zhang, X. A dynamic modeling approach to simulating socioeconomic effects on landscape changes. **Ecological Modelling**, v. 140, p.141–162. 2001.

Weintraub, A.; Barahona, F.; Epstein, R. A column generation algorithm for solving general forest planning problems with adjacency constraints. **Forest Science**, v.40, p. 142–161. 1994.

Weintraub, A.; Church, R. L.; Murray, A. T.; Guignard, M. Forest management models and combinatorial algorithms: analysis of state of the art. **Annals of Operations Research** 96: 271-285. 2000.

Yoshimoto, A.; Haight, R. G.; Brodie, J. D. A comparison of the pattern search algorithm and the modified PATH algorithm for optimizing an individual tree model. **Forest Science**, v.36 (2), p. 394–412. 1990.

CAPÍTULO 2

REGULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FLORESTAS EQUIÂNEAS COM RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA

INTRODUÇÃO

As preocupações com o uso racional dos recursos florestais e a sustentabilidade socioambiental têm exigido novas abordagens como alternativas às estratégias clássicas de modelagem no planejamento florestal. Objetivos econômicos ainda predominam nos planos de manejo florestal, porém esses planos devem incorporar, também, objetivos ecológicos e sociais e, portanto, desempenhar um papel mais realista na tomada de decisões (Jorgensen, 2000; Bettinger et al., 2007). Isto requer o emprego de características espaciais e temporais nos planos de manejo.

A aplicação de restrições sociais e ambientais pode ser feita de duas formas distintas. A primeira, e mais óbvia, resume-se na incorporação direta das restrições, ou sob a forma de metas, nos algoritmos exatos tradicionais de programação linear e de programação inteira (Kirby, 1980; Covington et al., 1988; Jones et al., 1991; Hof e Joyce, 1992; Hof e Joyce, 1993; Hof et al., 1994; Murray e Church, 1995b; Snyder e ReVelle, 1996; Snyder e ReVelle, 1997; Bevers e Hof, 1999; McDill e Braze, 2000, 2001; Rodrigues, 2002; Alonso, 2003; Castro, 2007).

Uma segunda forma consiste em encontrar métodos alternativos para elaboração dos planos de manejo, com a aplicação de heurísticas ou técnicas de simulação

(Baskent e Jordan, 1991; Bare e Mendoza, 1992; Aarts e Lenstra, 1997; Wang e Zhang, 2001; Baskent e Jordan, 2002; Rodrigues et al., 2003; Rodrigues et al., 2004a, 2004b; Bettinger et al., 2007).

O problema da gestão dos recursos naturais é complexo e, muitas vezes, impossível de ser resolvido por métodos exatos tradicionais. Esta complexidade aumenta à medida que são acrescentadas variáveis de decisão inteiras (Lockwood e Moore, 1993; Rodrigues, 2001; Bettinger et al., 2005).

Preferência por paisagens com beleza cênica é inerente às pessoas e varia de um grupo socioeconômico para outro. Isto contribui para justificar a necessidade de considerar as belezas paisagísticas da floresta nos planos de manejo florestal (Baskent e Jordan, 1995; Wang e Zhang, 2001; Pukkala e Gadow, 2008; Bettinger et al., 2009).

A aplicação de restrições de adjacência é uma das maneiras mais frequentes de se implementar restrições socioambientais em modelos de regulação florestal (Castro, 2007; Alonso, 2003). Estas restrições buscam minimizar os impactos ambientais gerados pela descaracterização dos habitats naturais, evitando-se o corte de extensas áreas contíguas, promovendo abrigo e alimento às populações que vivem nas florestas manejadas. Busca-se, com isso, aliar conservação e produção nas áreas florestais, bem como mitigar os impactos visuais causados pela atividade de colheita (Castro, 2007; Moreira, 2008). A incorporação destas restrições pode ocorrer de duas maneiras distintas: modelos restritos por unidade (MRU) e modelos restritos por área (MRA) (Murray, 1999; Murray e Snyder, 2000; Baskent e Jordan, 1995; Crowe et al., 2003).

Nos MRA considera-se que áreas adjacentes podem ser cortadas; contudo, a soma das áreas das unidades de manejo não pode ultrapassar um limite pré-definido. Já para os MRU, assume-se que o tamanho da unidade de manejo seja suficientemente grande para impedir o corte de unidades vizinhas (Baskent e Keles, 2005). Como no Brasil as unidades de manejo são geralmente definidas antes da implantação dos povoamentos e são relativamente grandes, a modelagem empregando MRU deve ser preferida. Contudo, a aplicação de tais restrições requer que a seleção de prescrições para as unidades de manejo seja feita utilizando variáveis binárias. O porte do problema resultante inviabiliza a aplicação de métodos tradicionais de pesquisa operacional, sendo necessária aplicação de técnicas de simulação ou heurísticas (O'Hara et al., 1989; Clements et al., 1990; Nelson e Brodie, 1990; Dahlin e Sallnas, 1993;

Daust e Nelson, 1993; Murray e Church, 1995a; Snyder e ReVelle, 1996; Mullen e Butler, 1997; Brumelle et al., 1998; Hoganson e Borges, 1998; Boston e Bettinger, 1999; Rodrigues, 2001; Baskent e Jordan, 2002; Crowe e Nelson, 2003).

Dentre as meta-heurísticas mais utilizadas para resolver problemas de grande porte e complexidade, destacam-se os algoritmos genéticos, devido à sua fácil implementação e desempenho computacional (Gen e Cheng, 2000; Rodrigues 2001; Hiller e Liberman, 2006). No presente trabalho esta meta-heurísticas foi empregada em um modelo de regulação florestal para uma floresta de eucalipto, com restrições de adjacência.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição dos dados

Uma situação encontrada em certa empresa florestal de Minas Gerais foi utilizada como estudo de caso. A área total da fazenda modelo é de 9.750 ha, sendo que 35 % (3.412 ha) são de plantio efetivo e o restante constitui-se de reserva legal e áreas de preservação permanente (Figura 2.1). Essa área foi dividida em 135 unidades de manejo, em função de características administrativas, edafoclimáticas e fisiográficas. A área média de cada unidade de manejo é de 25 ha. A disposição das unidades de manejo e de classes de idade atual é apresentada na Figura 2.2.

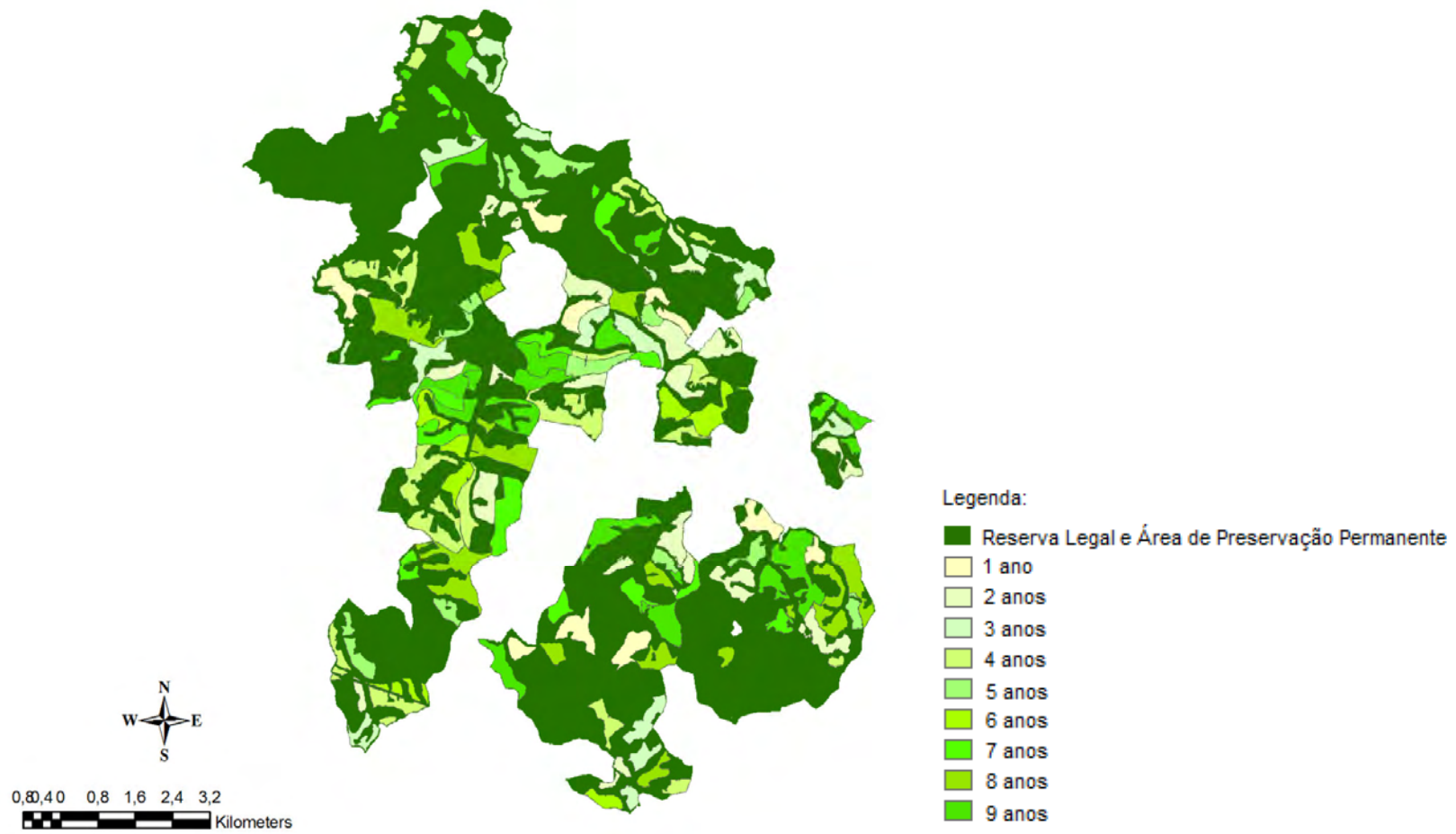


Figura 2.1: Distribuição espacial de classes de idade das áreas da fazenda modelo.

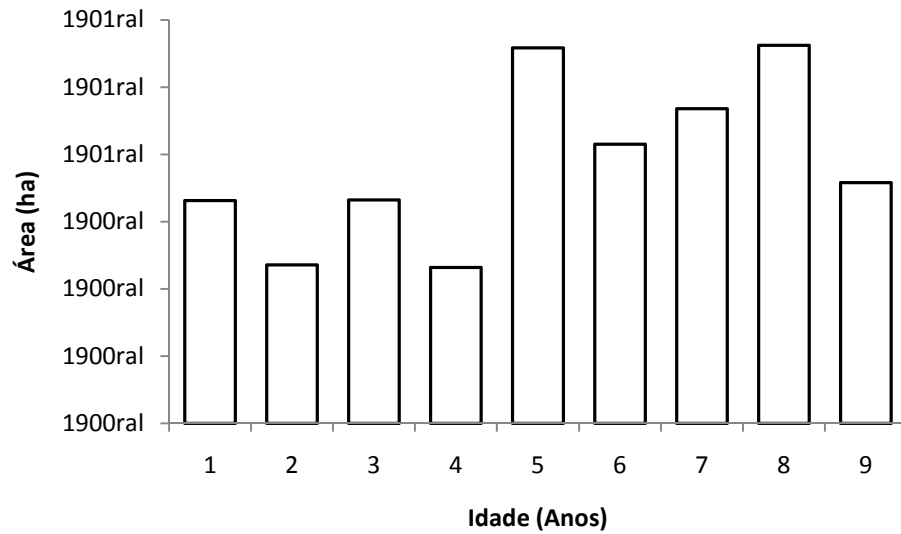


Figura 2.2: Distribuição inicial por classes de idade das áreas da fazenda modelo.

Modelos Matemáticos

O modelo foi formulado empregando-se o sistema de planejamento florestal otimizado *SifPlan* (www.treesoftware.com.br). Para a geração de unidades de manejo foi utilizado o modelo I, descritas em Curtis (1962) e Johnson e Scheurman (1977), com a utilização de variáveis binárias para as variáveis decisórias, resultando em:

Função Objetivo:

$$Max. Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \geq Dmin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \leq Dmax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

em que Z é o Valor Presente Líquido Global (R\$);

x_{ij} são variáveis de decisão, representando a j -ésima alternativa de manejo adotada na i -ésima unidade de manejo;

c_{ij} é Valor Presente Líquido de cada unidade de manejo i , manejada segundo a alternativa de manejo j ;

m é o número total de unidades de manejo;

n é número total de alternativas de manejo para a i -ésima unidade de manejo;

V_{ijk} é o volume (m^3) produzido, no período k , pela i -ésima unidade de manejo adotando-se a j -ésima alternativa de manejo; $Dmin_k$ e $Dmax_k$ são as demandas volumétricas (m^3) mínima e máxima respectivamente, em cada período do horizonte de planejamento.

Devido à topografia muito acidentada da área de estudo, as unidades de manejo foram consideradas adjacentes quando a distância entre seus limites (bordas) apresentava-se menor ou igual a 50 m. A restrição de adjacência para se evitar o corte de unidades de manejo adjacentes é dada por:

$$n_i x_{ij} + \sum_{i \in N_i} x_{ij} \leq n_i \quad \forall i, k \quad (6)$$

em que n_i refere-se ao número de unidades de manejo adjacentes que apresentam cortes no período k (Church et al., 1998).

De acordo com esse modelo de programação inteira mista, a maximização do valor presente global (1) está sujeita às restrições de singularidade (2) e (5) e às produções mínima (3) e máxima (4), em cada período do horizonte de planejamento. A restrição (6) garante que áreas adjacentes não serão cortadas no mesmo período. Definiu-se o horizonte de planejamento como de 1,5 ciclos conforme sugerido por Leuschener (1984); admitindo uma rotação de 6 anos e um ciclo de 2 rotações, o horizonte de planejamento foi de 18 anos.

As intervenções nos povoamentos incluíram corte seguido de imediata reforma ou corte com reforma no próximo período, o que significa que apenas um regime de manejo (alto-fuste) foi avaliado. Possibilitou-se a variação da idade de corte entre 5 a 9 anos, dentro do horizonte de planejamento. Atribuiu-se a idade regulatória como sendo de seis anos. Para fins de comparação, produziu-se outro modelo sem as restrições de adjacência.

Algoritmo Genético

O AG foi implementado em uma rotina computacional utilizando o ambiente de programação *Visual Basic for Applications* em conjunto com o Software Excel.

Os testes com o algoritmo foram efetuados em um microcomputador Dual Core 1.46 GHZ, com memória RAM de 3 Gb. A estrutura geral do algoritmo genético é apresentada na Figura 1.1.

As soluções (indivíduos) geradas para o problema em questão apresentaram o formato de um vetor $V(x) = \{X_{11}, X_{12}, \dots, X_{ij}\}$, onde a variável de decisão X_{ij} ($X_{ij} \in \{0,1\}$), simboliza a alternativa de manejo j ($j=1,2,\dots,n$) assinalada à unidade de manejo i ($i=1,2,\dots,m$). A fim de satisfazer a restrição de singularidade, a geração de indivíduos e demais operações aplicadas a eles foram feitas com a seguinte regra: se uma variável de decisão de um talhão tiver sido assinalada (receber o valor 1), as demais alternativas recebem valor nulo. Essa estratégia facilita a evolução do algoritmo, visto que este não produz indivíduos que futuramente deverão ser excluídos (Rodrigues et al., 2004).

Na terminologia dos AG, cada indivíduo ou cromossomo representa uma solução para o problema em questão e cada gene equivale a uma alternativa de manejo (X_{ij}). Aos possíveis estados assumidos por cada gene dá-se o nome de alelo e a posição dos genes denomina-se *locus*. A avaliação de cada solução é feita segundo uma função de aptidão ou *fitness*, usualmente igual à função objetivo $f(X)$ do problema.

A função de aptidão do algoritmo genético empregado nesse trabalho baseia-se na aplicação de penalidades à função objetivo, que consiste em maximizar o valor presente líquido global. As penalidades impostas referem-se à variação volumétrica acima ou abaixo da demanda proposta, áreas com cortes adjacentes e distribuição irregular de classes de idades ao final do horizonte de planejamento. A função de *fitness* é apresentada a seguir:

$$\text{Max. fitness} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \alpha (H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij})^2 - \beta (\sum_{k=0}^{k=h-1} y_i)^2 - \gamma (A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i)^2$$

em que, H_k = demanda volumétrica (m^3), no k -ésimo período do horizonte de planejamento; α , β e γ são os coeficientes de penalidade associados a cada restrição; y_{ij} refere-se ao número de unidades adjacentes cortadas em um mesmo período; A_l = área regulatória e A_i = área da unidade de manejo i .

Neste estudo, a população inicial foi constituída de 30 indivíduos gerados aleatoriamente, considerando-se a viabilidade de cada solução pela restrição de singularidade. Os operadores genéticos utilizados foram a mutação e o *crossover*.

O *crossover* é o principal processo de busca do algoritmo: dois pais (soluções escolhidas dentro da população), quando selecionados para o cruzamento, produzem dois novos indivíduos. Utilizou-se o *crossover* de múltiplos pontos, onde os novos

indivíduos são gerados por fragmentos de diversos pontos da sequência binária que constitui os seus pais. A mutação tem como função garantir que, se a população estabilizar em um máximo local, esta possa se deslocar para um ponto de máximo global. Na mutação, genes aleatórios em indivíduos aleatórios na população possuem seus valores alterados aleatoriamente. Utilizou-se como mutação uma taxa de 0,6% de cada indivíduo da população.

A escolha dos indivíduos que continuarão na população ou que serão selecionados para reproduzir depende do método de seleção utilizado. Nesse trabalho utilizou-se o método do elitismo em que, após o cálculo do *fitness*, os indivíduos são escalonados e os piores são excluídos.

Por ser um processo iterativo, o AG necessita da determinação de um critério de parada, ou seja, um momento onde se considera a melhor solução da população como sendo uma solução aceitável para o problema. Critérios como número de iterações, tempo de processamento e estabilização do *fitness* são comumente usados para definir a parada desse tipo de algoritmo. Neste estudo, interrompeu-se a evolução do AG quando, após a estabilização do *fitness*, o AG realizou 20 novas gerações.

Produção, receita e custo

Considerou-se somente o plantio de um clone híbrido (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) como sendo a única fonte de madeira utilizada pela empresa. A curva de produção obtida a partir de dados de parcelas de inventário florestal e utilizada neste estudo foi:

$$Volume = \frac{485,68}{1 + 7,4275 e^{-0,4062 Idade}}$$

em que a idade está em meses.

Os valores de custos utilizados constam na Tabela 2.1. A taxa de juros utilizada foi de 8,75% ao ano e o valor de venda da madeira foi de R\$ 80,00/m³. O custo de colheita foi calculado em função da produtividade, através da expressão $Custo (R\$/m^3) = 37,59 \text{ Produtividade}^{-0,035}$.

Tabela 2.1: Custos empregados para a avaliação econômica dos modelos de regulação.

Ano	Atividade	Rendimento (Un/ha)	Unid.	Custo Unitário	Aplicação (%)	Total (R\$/ha)
1º ano	Adubação Manual (Calcário)	20,00	hh	14,73	100%	294,58
1º ano	Adubação NPK 06-10-29	13,00	hh	14,34	100%	186,47
1º ano	Adubação NPK 06-30-06	10,00	hh	12,40	100%	123,95
1º ano	Ajudante Florestal	20,00	hh	11,39	100%	227,74
1º ano	Alinhamento/Marcação	10,00	hh	11,39	100%	113,87
1º ano	Capina Química Manual Total	1100	hh	14,51	80%	127,68
1º ano	Capina Química Mecânica Total	0,95	hh	88,26	20%	16,77
1º ano	Combate à Formiga Sistemático	3,50	hh	11,93	100%	41,75
1º ano	Combate à Formiga convencional	8,00	hh	11,93	10%	104,97
1º ano	Coveamento Motorizado	17,00	hh	22,99	80%	312,63
1º ano	Irrigação Caminhão Pipa	16,00	hh	18,57	100%	297,18
1º ano	Limpeza Manual	80,00	hh	11,39	30%	273,29
1º ano	Operador de Motosserra	2,00	hh	27,69	100%	55,38
1º ano	Planificação	5,00	hh	80,00	0%	-
1º ano	Plantio c/ Gel	17,00	hh	16,71	100%	284,00
1º ano	Replântio c/ Gel	7,00	hh	16,71	100%	116,94
1º ano	Roçada Manual	30,00	hh	11,39	70%	239,13
1º ano	Subsolagem/Fosfatagem	1,50	hh	135,70	20%	40,71
1º ano	Calcário	1,50	t	59,94	100%	89,91
1º ano	Cupinicida	0,03	kg	845,13	100%	27,89
1º ano	Formicida	8,00	kg	4,27	10%	37,58
1º ano	Frete Mudas / Insumos	100	ha	132,00	100%	132,00
1º ano	Gel	3,00	kg	6,69	100%	20,07
1º ano	Herbicida	6,00	l	9,53	100%	57,18
1º ano	Map	0,33	kg	1,35	100%	0,45
1º ano	Mudas	120	mil	23140	100%	2777,71
1º ano	NPK 06-10-29	0,40	t	949,95	100%	379,98
1º ano	NPK 06-30-06	0,12	t	939,71	100%	113,57
1º ano	Topografia	100	ha	65,67	100%	65,67
2º Ano	Adubação NPK 06-10-29	13,00	hh	14,34	100%	186,47
2º Ano	Ajudante Florestal	10,00	hh	11,14	100%	111,40
2º Ano	Capina Química Manual Total	15,00	hh	14,51	100%	217,64
2º Ano	Combate à formiga convencional	6,00	hh	11,93	10%	78,73
2º Ano	Construção Manual de Aceiro	200,00	hh	11,39	10%	227,74
2º Ano	Coroamento	16,00	hh	11,39	100%	182,19
2º Ano	Roçada Manual - Pós-Plantio	16,00	hh	11,39	100%	182,19
2º Ano	Formicida	7,00	kg	4,27	10%	32,88
2º Ano	Herbicida	3,00	l	9,53	100%	28,59
2º Ano	NPK 06-10-29	0,40	t	949,95	100%	379,98
3º Ano	Capina Química Manual Total	13,00	hh	14,51	100%	188,62
3º Ano	Combate à Formiga Convencional	6,00	hh	11,93	10%	78,73
3º Ano	Manutenção Manual de Aceiro	200,00	hh	11,39	10%	227,74
3º Ano	Roçada manual	16,00	hh	11,39	100%	182,19
3º Ano	Formicida	5,00	kg	4,27	10%	23,49
3º Ano	Herbicida	6,00	kg	9,53	100%	57,18
4º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
4º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
5º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
5º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
6º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
6º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
7º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
7º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
Total						6.797,33

Avaliação da dispersão das intervenções nas unidades de manejo

Entre as diversas métricas utilizadas para avaliação do manejo da paisagem encontradas na literatura (Baskent e Jordan, 1995), optou-se por avaliar o efeito da restrição de adjacência pela média ponderada do inverso da menor distância entre unidades de manejo cortadas no mesmo período, pelas áreas das unidades de manejo que sofrem intervenção. Quando menor o valor apresentado pelo IAC, melhor ambientalmente será o plano de manejo. O índice utilizado foi:

$$IAC = \frac{\sum_{k=0}^{H-1} \sum_{i=1}^m A_i^2 \left(\frac{1}{d_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^m A_i}$$

em que IAC = índice de área sem cobertura florestal, A_i = área da unidade de manejo i com intervenção, em hectares, d_i = distância até a unidade de manejo mais próxima com intervenção, em quilômetros.

RESULTADOS

A formulação do modelo de planejamento resultou em um modelo com 8.755 variáveis decisórias. As formulações das restrições de adjacência resultaram em 37.555 restrições. A variação anual de volume dos modelos de regulação com e sem a inclusão das restrições de adjacência é apresentada nas Figuras 2.3 e 2.4. A imposição das restrições de adjacência reduziu o VPL global em torno de 8%. O valor da função objetivo para os modelos com e sem a inclusão das restrições de adjacência foi de R\$ 17.143.857,17 e R\$ 18.599.169,37, respectivamente.

A influência da imposição das restrições de adjacência na dinâmica espacial é apresentada na Figura 2.5. O valor do IASC para o modelo com e sem a inclusão da restrição de adjacência foi de 0,246436 e 0,615032, respectivamente.

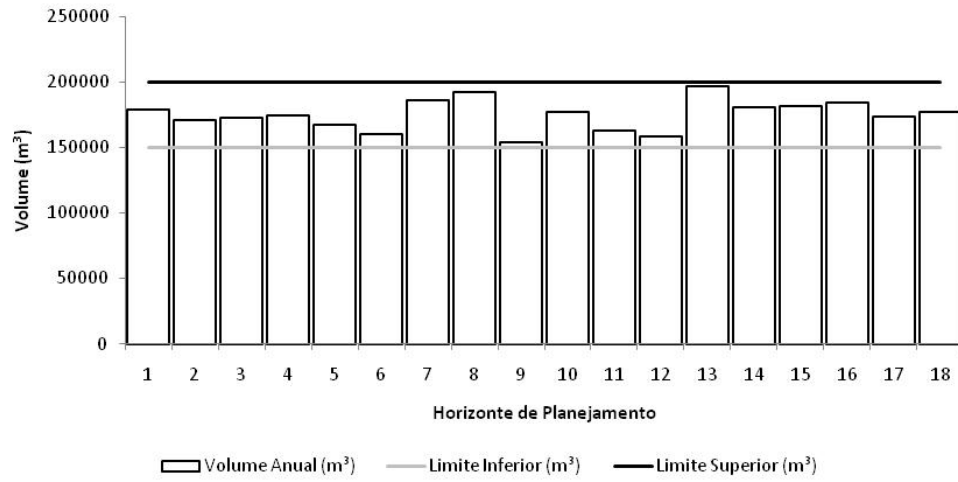


Figura 2.3: Variação anual volumétrica com a inclusão de restrições de adjacência.

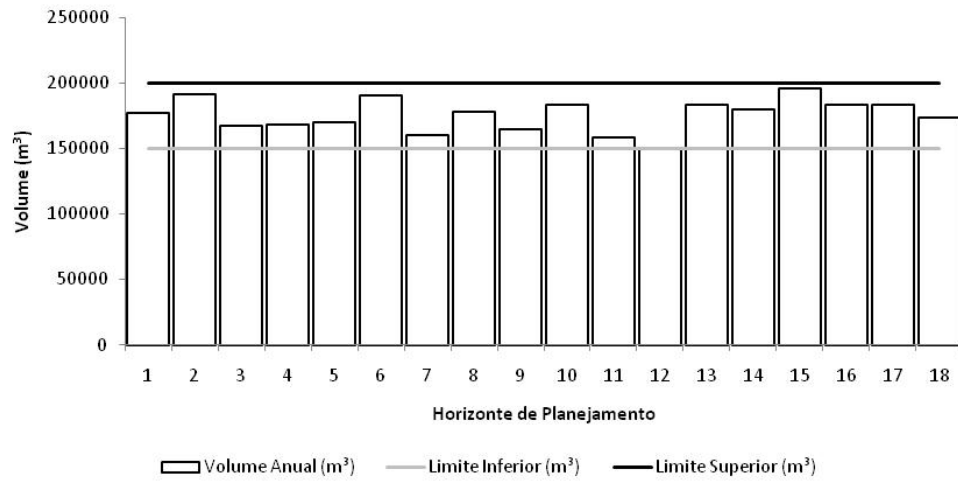
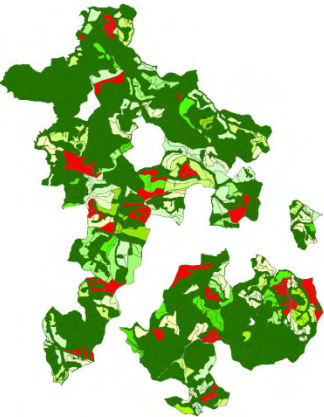
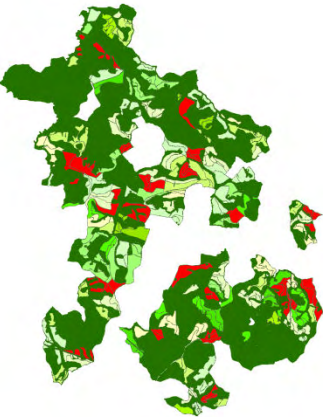

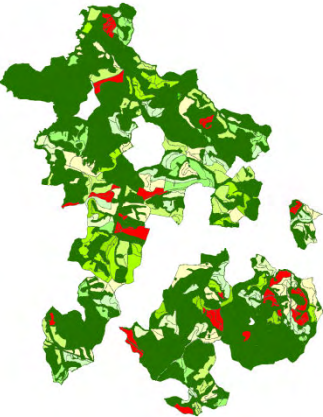
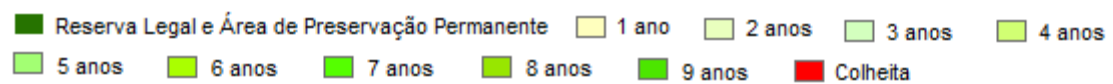
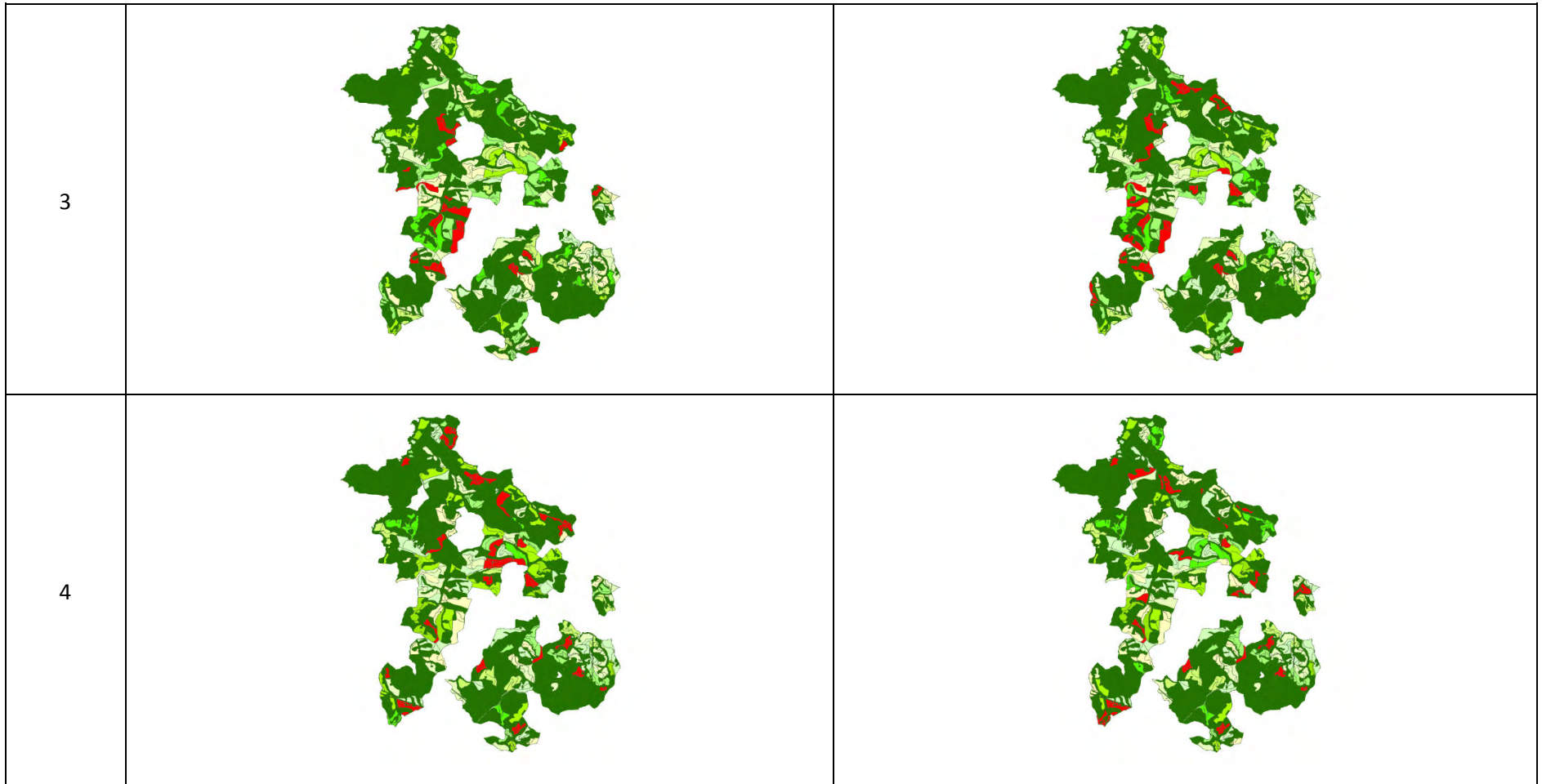


Figura 2.4: Variação anual volumétrica sem a inclusão de restrições de adjacência.

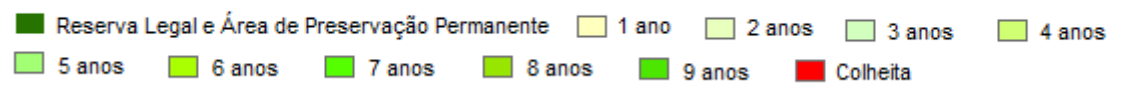
Período	Sem Restrição de Adjacência	Com restrição de Adjacência
1		
2		

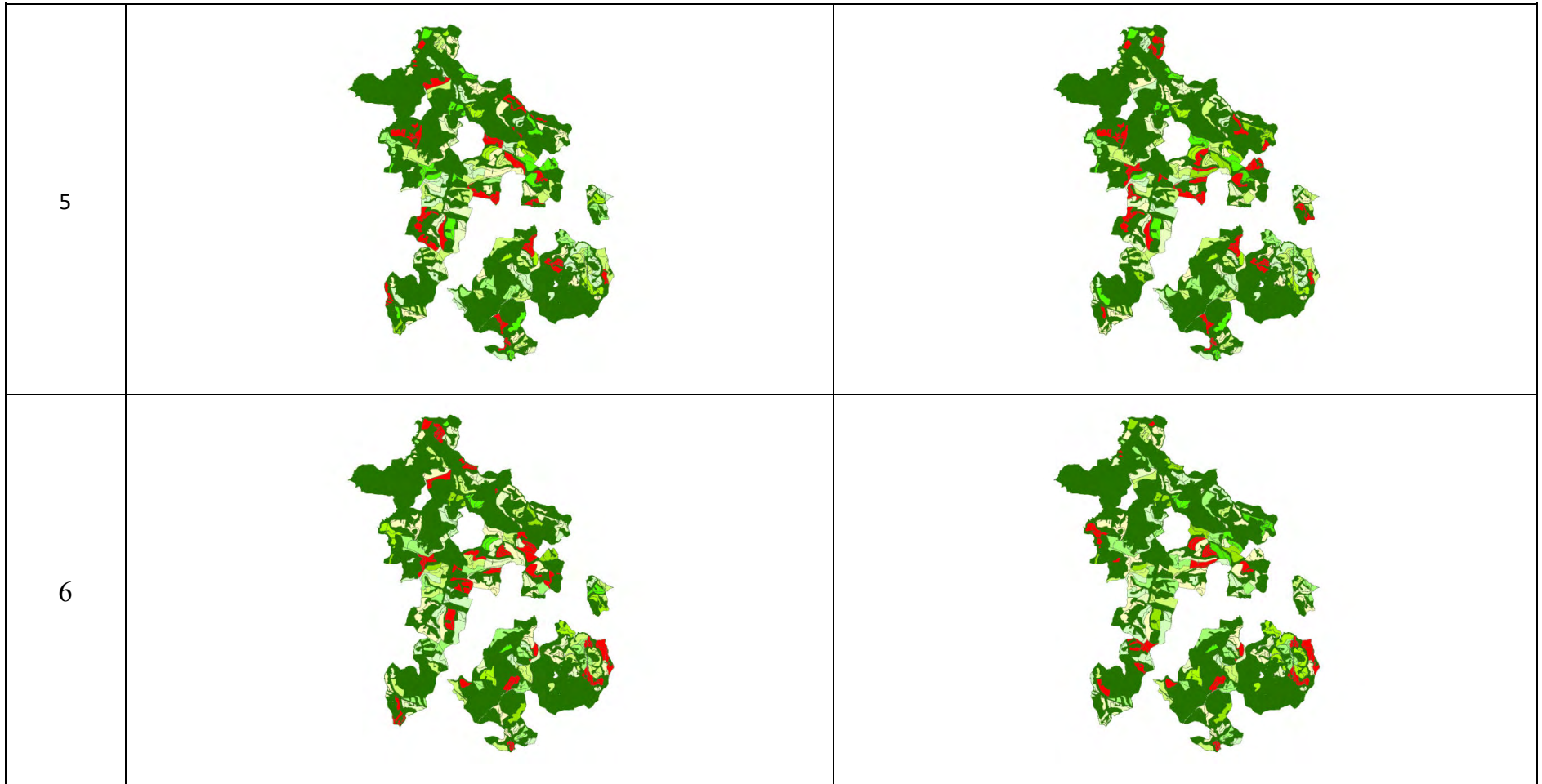
Legenda:



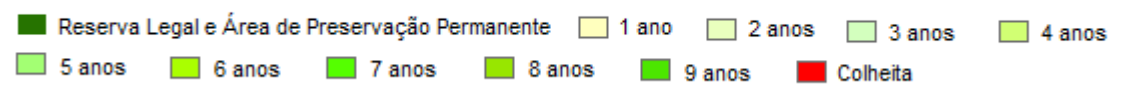


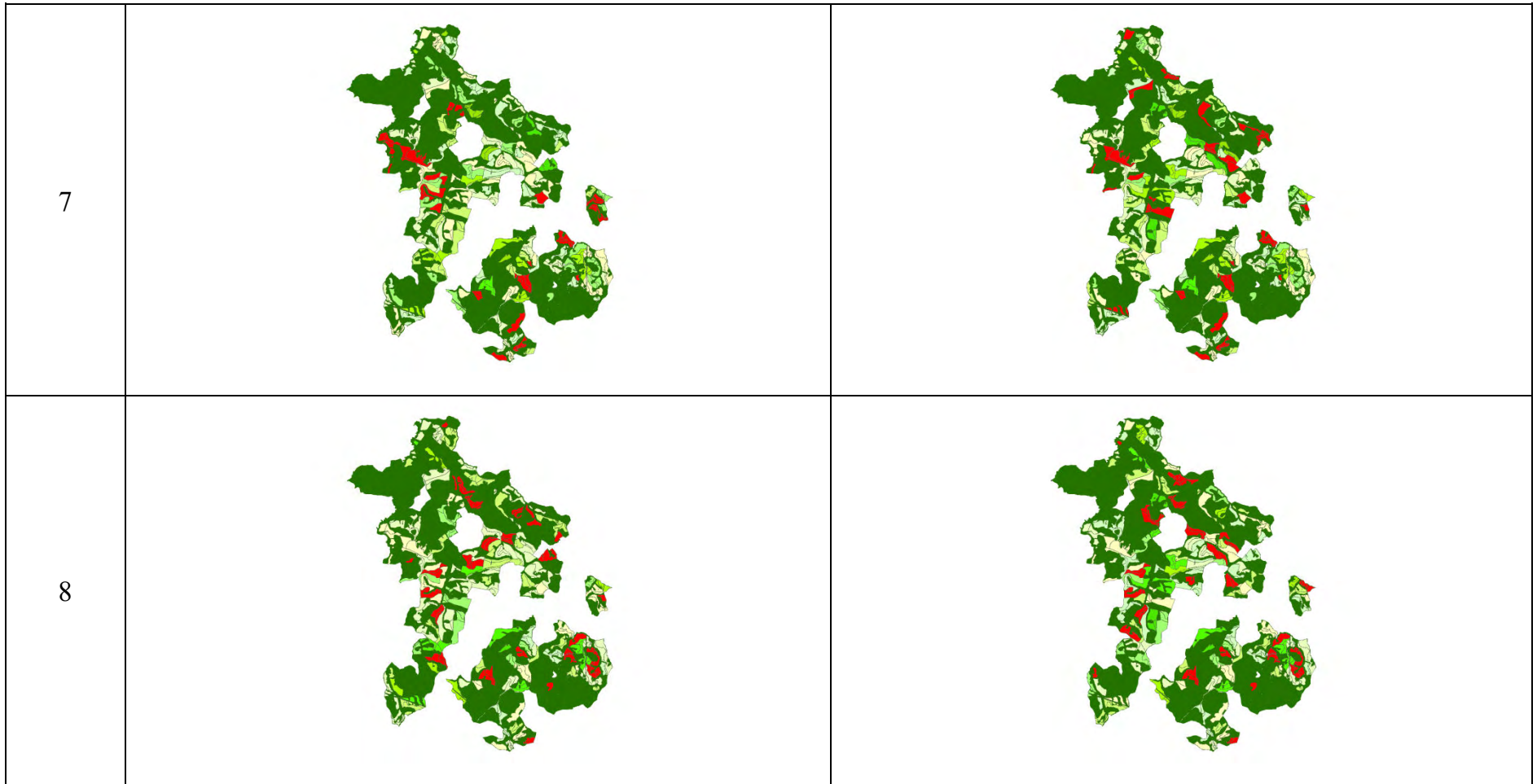
Legenda:



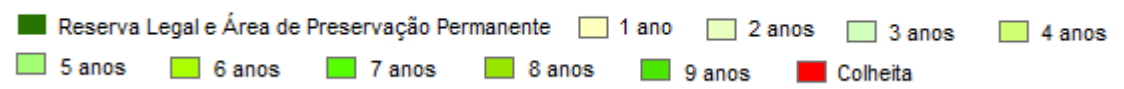


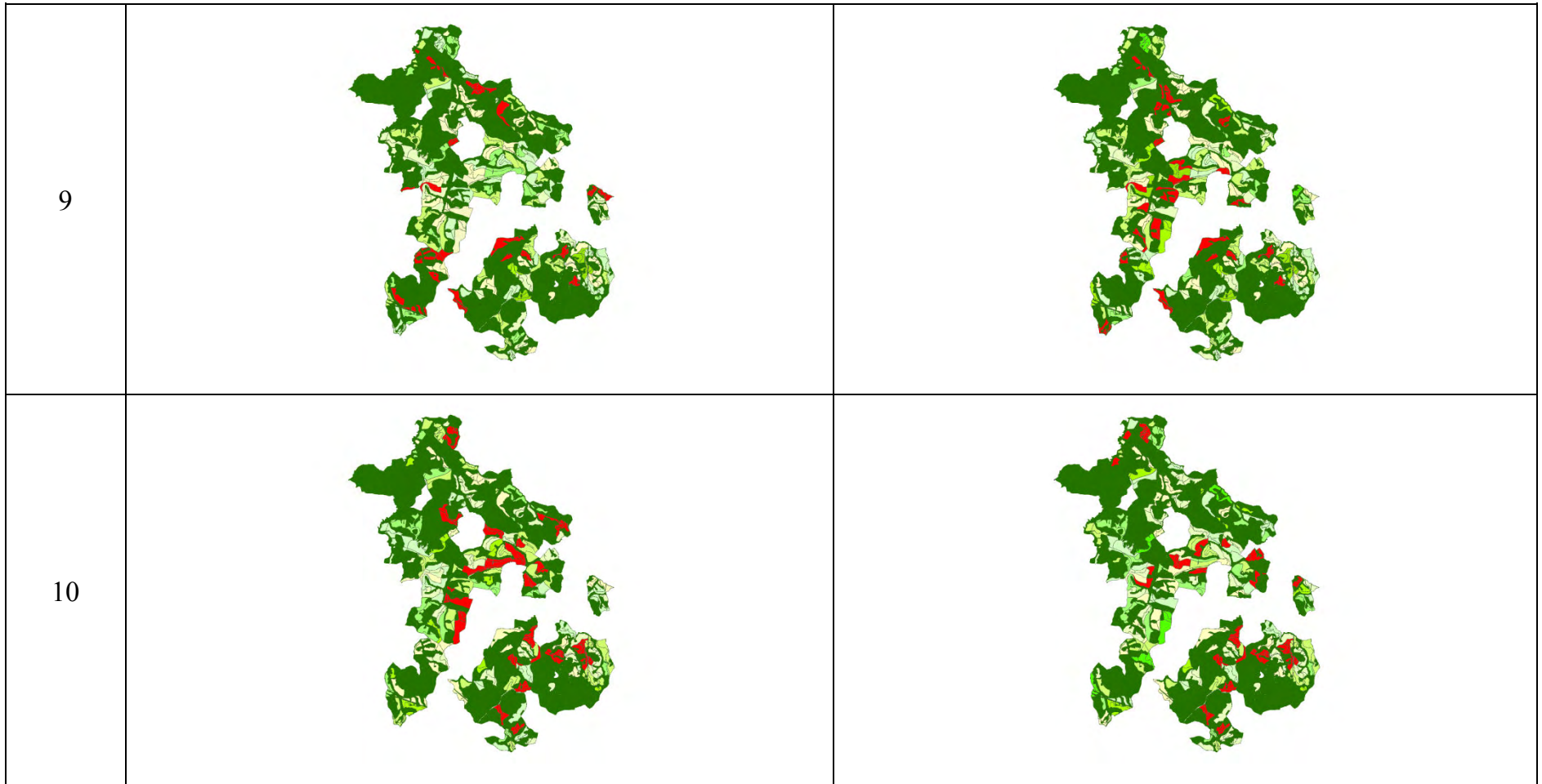
Legenda:



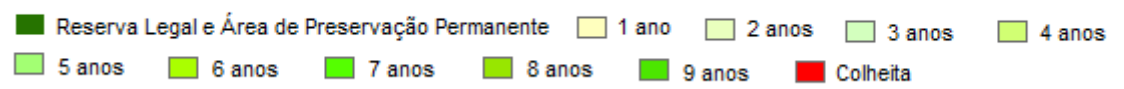


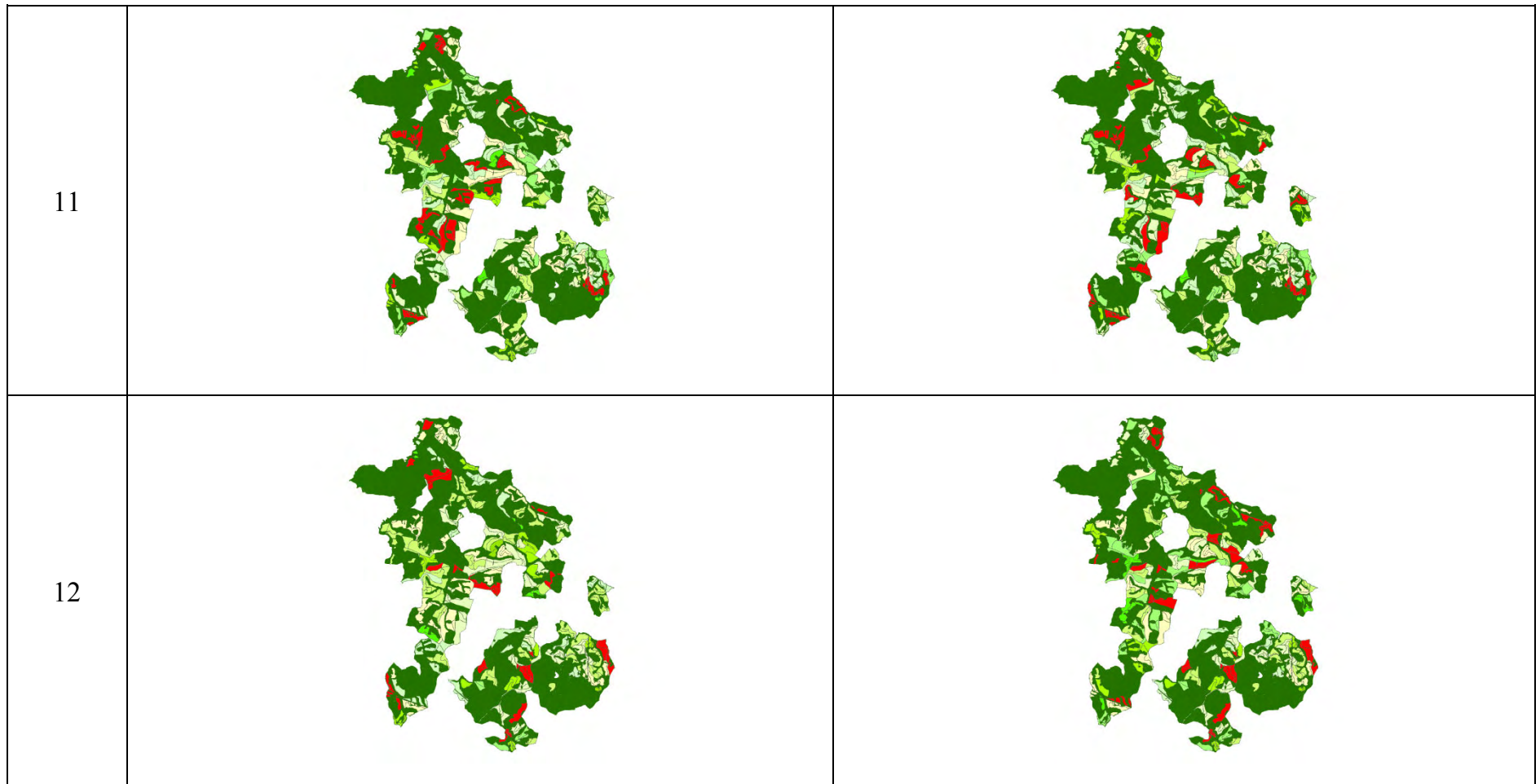
Legenda:



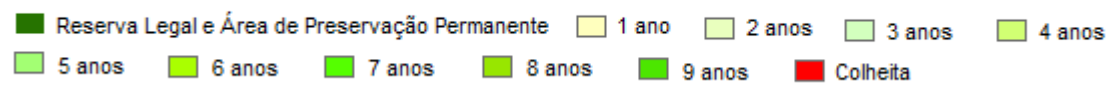


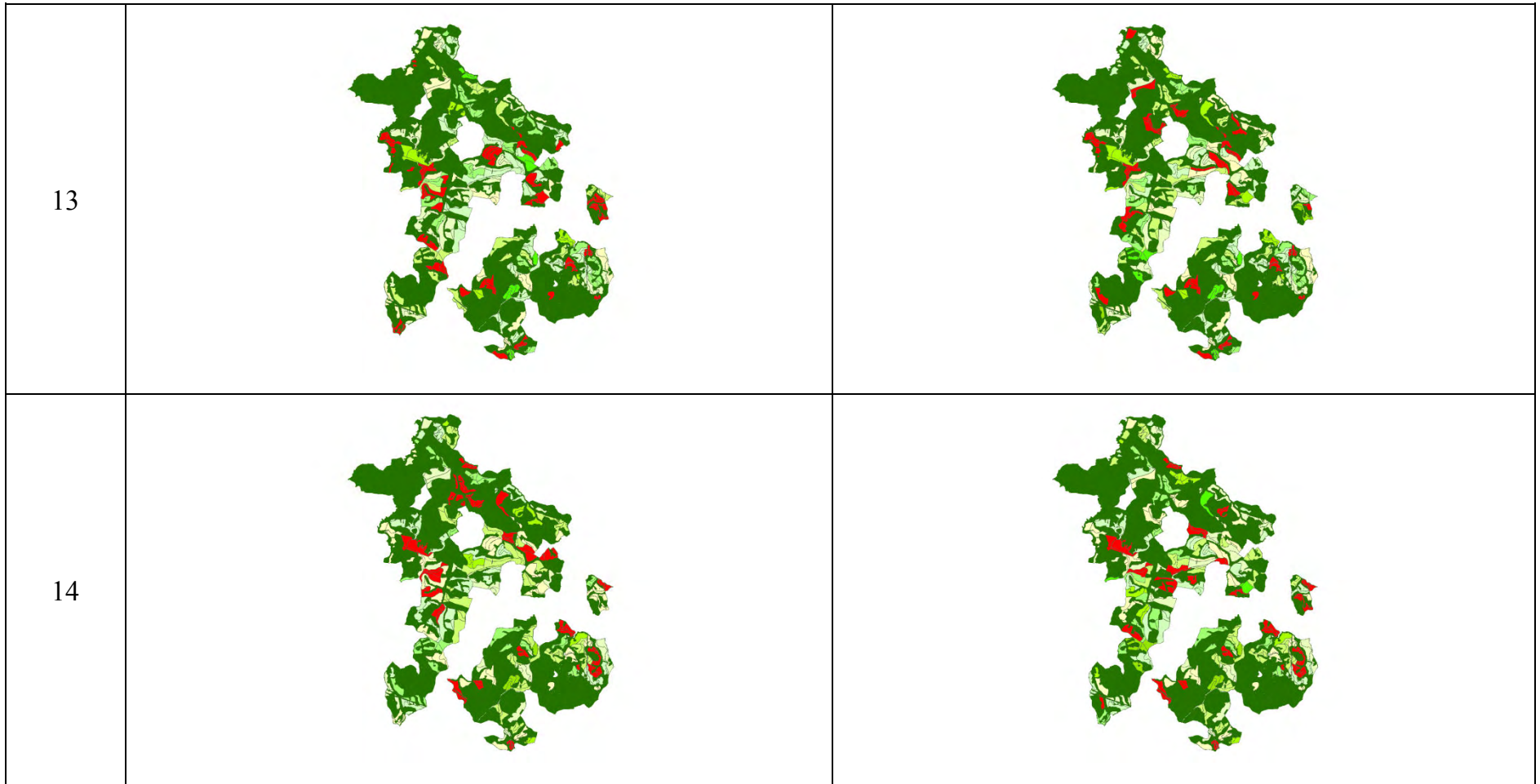
Legenda:



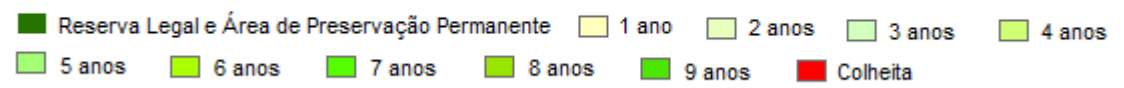


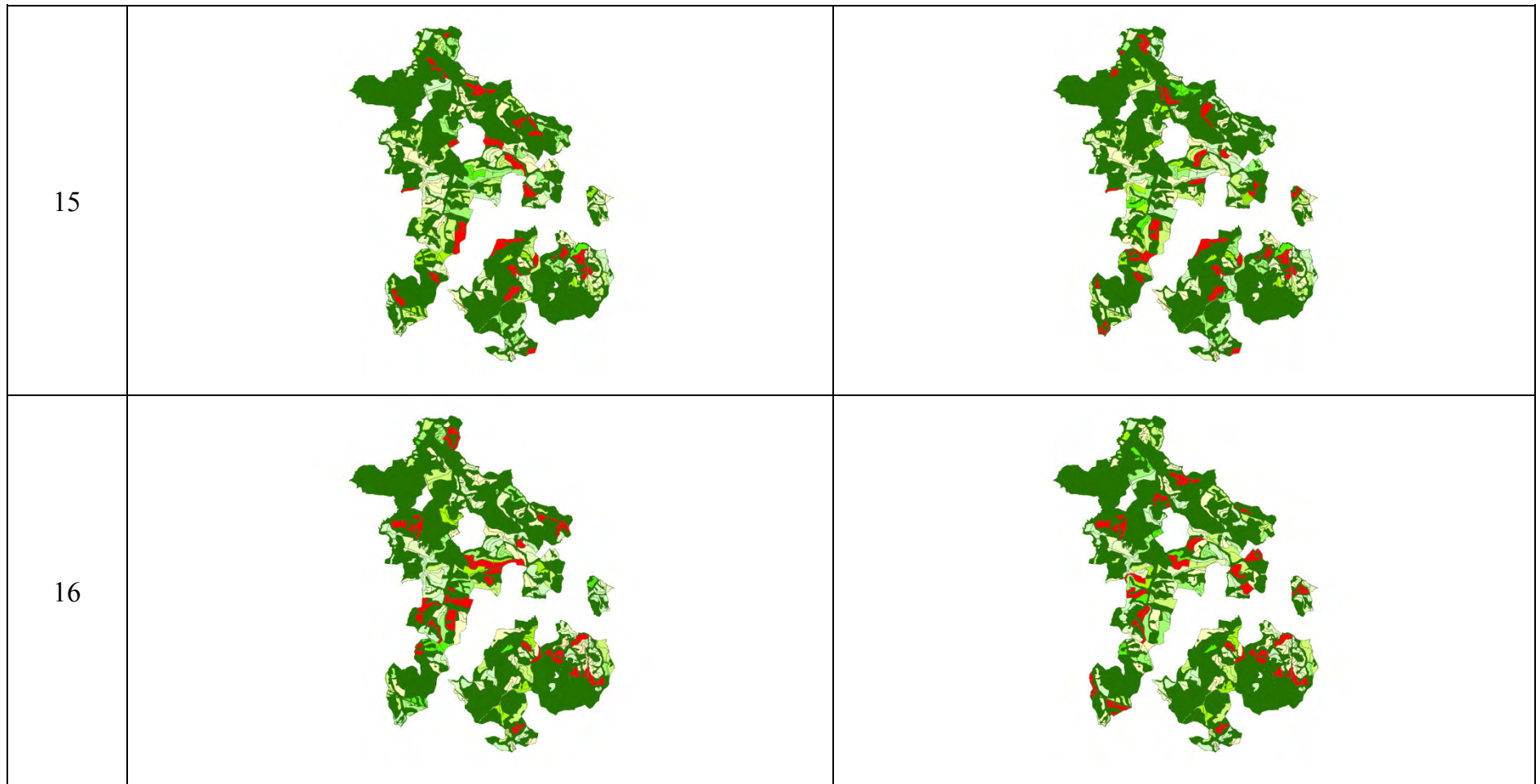
Legenda:



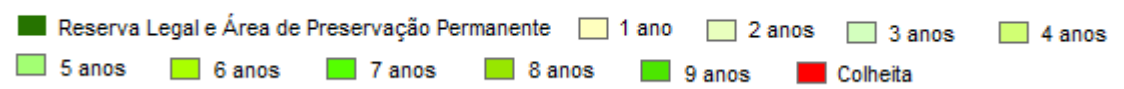


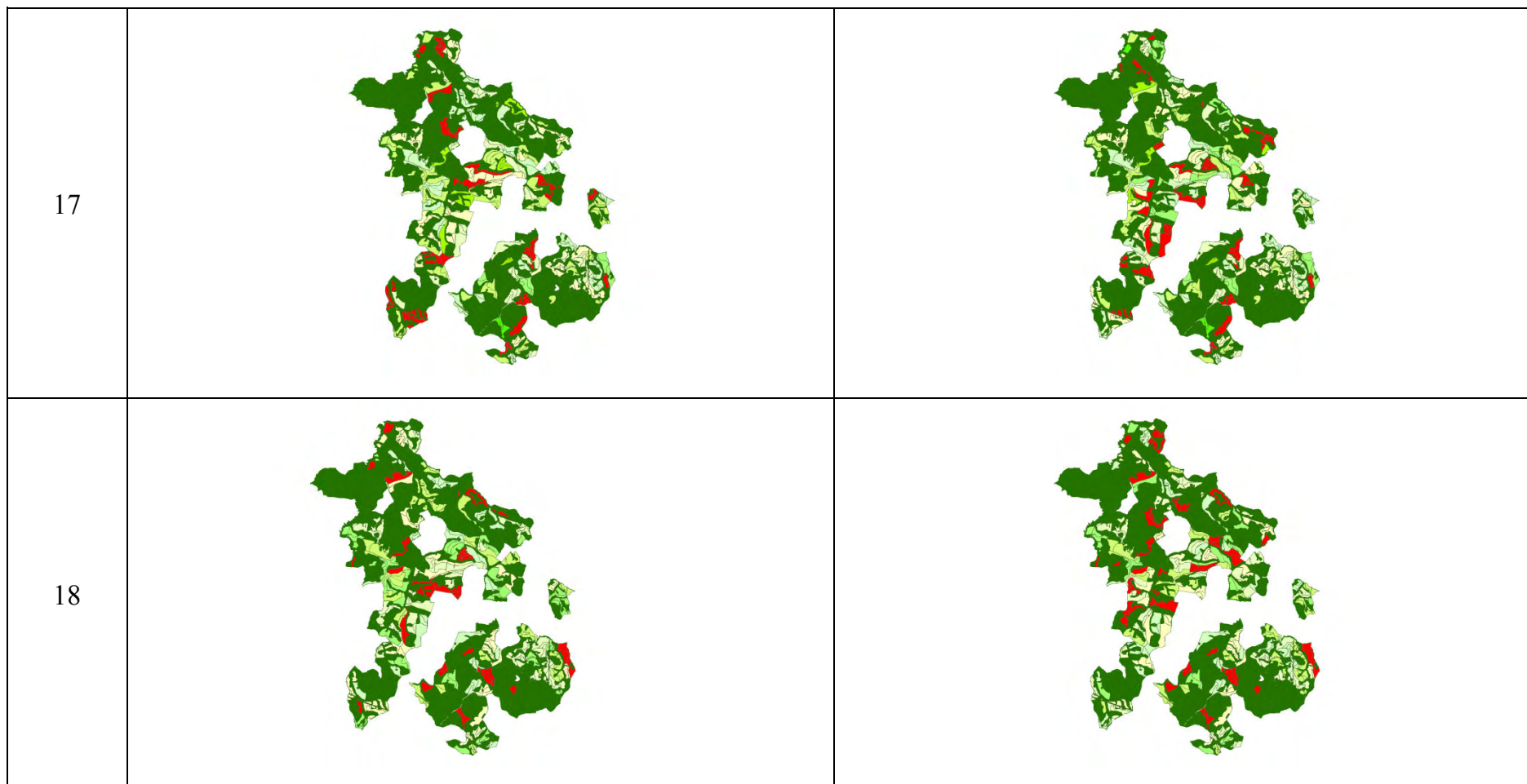
Legenda:





Legenda:





Legenda:

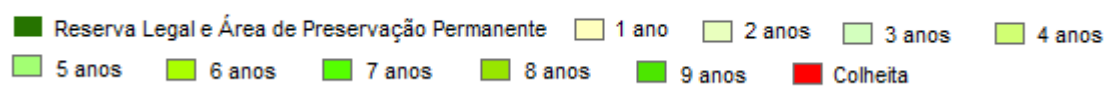


Figura 2.5: Distribuição espacial das classes de idade do modelo com adjacência, e o modelo de regulação clássica.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A aplicação do algoritmo genético para resolver o problema de regulação proposto neste estudo permitiu a gestão sustentável da floresta. A eficiência das técnicas de simulação pode ser constatada em outros trabalhos, como a *busca tabu* (Bettinger et al., 1997, 1998, 2002; Murray e Church, 1995; Boston e Bettinger, 1999; Rodrigues 2001, 2004), *simulated annealing* (Boston e Bettinger, 1999; Murray e Church, 1995; Van Deusen, 1999; Rodrigues 2001 Bettinger et al., 2002;), *threshold accepting* (Bettinger et al., 2003), algoritmos genéticos (Ducheyne et al., 2004; Rodrigues, 2004) e métodos híbridos (Clark et al., 2000; Boston e Bettinger, 2002).

A utilização de heurísticas tem se mostrado uma ferramenta extremamente útil para a aplicação no manejo de florestas equiâneas e para a inclusão de objetivos que resultam em problemas impossíveis de serem resolvidos com os métodos tradicionais de programação matemática (Hoganson e Rose, 1984; Bettinger et al., 2008). Aplicações como manejo de fauna (Arthaud e Rose, 1996; Haight e Travis, 1997; Bettinger et al., 1997; Kurttila et al., 2002), criação de corredores florestais (Moreira, 2008), efeitos sobre sistemas aquáticos (Bettinger et al., 1998) e sistemas de transporte florestal (Nelson e Brodie, 1990; Weintraub et al., 1995) são exemplos de problemas solucionados com heurísticas.

Não foi objetivo deste estudo avaliar o desempenho computacional do AG implementado, e sim avaliar a capacidade de solução do problema formulado. Assim, não foi dada ênfase ao tempo gasto ou à eficiência computacional.

Devido à crescente demanda da população por produtos que respeitem as questões ambientais e sociais, estudos que incluam restrições que produzam efeitos benéficos sobre o bioma e a população local são exigidos. A construção de modelos

matemáticos, algoritmos e heurísticas para a elaboração de planos de manejo desse tipo tem constituído um desafio para o planejamento florestal nas últimas décadas (Moreira, 2008).

A aplicação da técnica de algoritmo genético nesse trabalho teve como objetivo principal avaliar o efeito da aplicação em um modelo com restrições de caráter socioeconômico e ambiental. A comparação da variação volumétrica satisfaz à demanda de produção imposta em ambos os modelos. A inclusão da restrição de adjacência influencia principalmente o resultado da função objetivo (VPL global), reduzindo em cerca de 8%. Resultado semelhante foi observado por Castro (2007) que, utilizando programação inteira, encontrou uma redução em torno de 7 %. A redução da função objetivo foi realocada na própria floresta, visto que o manejo das intervenções na paisagem possui uma influencia socioeconômica significativa no contexto onde este está inserido (Wang e Zhang, 2001).

O índice utilizado para a comparação dos modelos apresenta-se extremamente simples e de fácil obtenção com a aplicação de técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). O índice apresenta-se consistente com base nos pressupostos adotados para o manejo de paisagem de plantios equiâneos. O índice é diretamente proporcional à área que sofre intervenção e inversamente proporcional à distância entre as unidades de manejo com intervenção, ponderada pela área de corte anual. Em termos práticos, quanto mais se aproximar de zero, maior será o ganho ambiental e socioeconômico sobre os ecossistemas e comunidades circunvizinhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarts, E.; Lenstra, J. K. Introduction. In: Aarts, E., ja Lenstra, J. K. (eds.) **Local search in combinatorial optimization**. John Wiley & Sons, New York, p. 1-16. 1997.
- Alonso, L. R. L. **O problema da consideração de restrições de adjacência em um planejamento florestal**. 2003. 114f. Dissertação(Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- Arthaud, G. J.; Rose, D. A methodology for estimating production possibility frontiers for wildlife habitat and timber value at the landscape level. **Canadian Journal of Forest Research**, v.26 (12), p.2191–2200. 1996.
- Bare, B. B.; Mendoza, G. A. Timber harvest scheduling in a fuzzy decision environment. **Canadian Journal of Forest Research**. v.22, p. 423 - 428. 1992.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Spatial wood supply simulation modeling. **Forestry Chronicle**, v. 67(6), p.610–621. 1991.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Characterising spatial structure of forest landscape. **Canadian Journal of Forest Research**, v.25, p. 1830-1849. 1995.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Forest landscape management modelling using *simulated annealing*. **Forest Ecology and Management**, v. 165 p.29-45. 2002.
- Baskent, E. Z.; Keles, S. Spatial Forest Planning: A review. **Ecological Modelling**, v.188, p. 145-173. 2005.
- Bettinger, P.; Kim, Y. H. Spatial optimisation - computational methods. In **Designing Green Landscapes**, Gadow, K., and T. Pukkala (eds.). Springer, New York. p. 111-135. 2008.
- Bettinger, P.; Sessions, J.; Boston, K. Using tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game. **Ecological Modelling**, v.42, p 111-123. 1997.

- Bettinger, P.; Graetz, D.; Boston, K.; Sessions, J.; Chung, W. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. **Silva Fennica** 36: 561–584. 2002.
- Bettinger, P.; Sessions, J.; Johnson, K.N. Ensuring the compatibility of aquatic habitat and commodity production goals in eastern Oregon with a tabu search procedure. **Forest Science**, v. 44, p. 96–112. 1998.
- Bettinger, P.; Johnson, D. L.; Johnson, K. N. Spatial forest plan development with ecological and economic goals. **Ecological Modelling**, v.169 (2/3), p. 215–236. 2003.
- Bettinger, P.; Boston, K.; Kim, Y-H; Zhu, J. Landscape-level optimization using tabu search and stand density-related forest management prescriptions. **European Journal of Operational Research**, v. 176 p.1265–1282. 2007
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, L. P., Grebner, R. L. **Forest Management and Planning**. Elsevier. 331p. 2009.
- Bettinger, P.; Lennette, M.; Johnson, K. N.; Spies, T. A. A hierarchical spatial framework for forest landscape planning. **Ecological Modelling**, v. 182, p. 25–48. 2005.
- Bevers, M.; Hof, J. Spatially optimizing wildlife habitat edge effects in forest management linear and mixed-integer programs. **Forest Science**, v.45 (2), p. 249–258. 1999.
- 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 (2), p. 292–301. 1999.
- Boston, K.; Bettinger, P. Combining tabu search and genetic algorithm heuristic techniques to solve spatial harvest scheduling problems. **Forest Science**, v.48 (1), p. 35–46. 2002.
- Brumelle, S.; Granot, D.; Halme, M.; Vertinsky, I. A tabu search algorithm for finding good forest harvest schedules satisfying green-up constraints. **European Journal of Operational Research**, v.106 (2/3), p. 408–424. 1998.
- Castro, R. R. **Regulação de Florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- Church, R. L.; Murray, A. T.; Weintraub, A. Locational issues in forest management. **Location Science**, v.6, p. 137–153. 1998.
- Clark, M. M.; Meller, R. D.; McDonald, T. P. A three stage heuristic for harvest scheduling with access road network development. **Forest Science**, v.46, p. 204–218. 2000.

- Clements, S. E.; Dallein, 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 (8), p. 25-33. 1988.
- Crowe, K.; Nelson, J. An indirect search algorithm for harvest scheduling under adjacency constraints. **Forest Science**, v. 49 (1), p. 1–11. 2003.
- Crowe, K.; Nelson, J.; Boyland, M. Solving the area-restricted harvest scheduling model using the branch and bound algorithm. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33, p. 1804–1814. 2003.
- Curtis, F. H. Linear programming the management of a forest property. **Journal Forestry**, v. (9), p.611–616. 1962.
- Dahlin, B.; Sallnäs, O. Harvest scheduling under adjacency constraints – a case study from the Swedish sub-alpine region. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v.8, p. 281–290. 1993.
- Daust, D. K.; Nelson, J. D. Spatial reduction factors for strata-based harvest schedules. **Forest Science**, v. 39, p. 152 165. 1993.
- Ducheyne, E. I.; De Wulf, R.; De Baets, B. Single versus multiple objective genetic algorithms for solving the even-flow forest management problem. **Forest Ecology and Management**, v. 201 (2/3), p. 259–273. 2004.
- Gen, M.; Cheng, R. **Genetic Algorithm and Engineering Optimization**, John Wiley and Sons, New York. 2000.
- Haight, R. G.; Travis, L. E. Wildlife conservation planning using stochastic optimization and importance sampling. **Forest Science**, v. 43 (1), p. 129–139. 1997.
- Hiller, F. S.; Lieberman, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8ª edição, McGraw-Hill, 2006. 828p.
- Hof, J.; Joyce, L. A. Spatial optimization for wildlife and timber in managed forest ecosystems. **Forest Science**, v. 38 (3), p. 489–508. 1992.
- Hof, J.; Joyce, L. A. A mixed integer linear programming approach for spatially optimizing wildlife and timber in managed forest ecosystem. **Forest Science**, v.39 (4), p. 816–834. 1993.
- Hof, J.; Bevers, M.; Joyce, L.; Kent, B. An integer programming approach for spatially and temporally optimizing wildlife populations. **Forest Science**, v.40 (1), p.177–191. 1994.

- Hoganson, H. M.; Rose, D. W. A simulation approach for optimal timber management scheduling. **Forest Science**, v.30, p.220–238. 1984.
- Hoganson, H., Borges, J. Using dynamic programming and overlapping subproblems to address adjacency in large harvest scheduling problems. **Forest Science**, v.44, p. 526–538. 1998.
- Johnson, K. N.; Scheurman, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis. **Forest science monography**, v.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 (5), p. 1283–1297. 1991.
- Jorgensen, S. E. Editorial: 25 years of ecological modelling by Ecological Modelling. **Ecological Modelling**, v.126 (2/3), p. 95–99. 2000.
- Kirby, M. W.; Wong, P.; Hager, W. A.; Huddleston, M. E. A Guide to the Integrated Resources Planning Model. **USDA Forest Service**. Berkeley. CA. 1980.
- Kurttila, M.; Pukkala, T.; Loikkanen, J. The performance of alternative spatial objective types in forest planning calculations: a case for flying squirrel and moose. **Forest Ecology and Management**, v.166, p. 245–260. 2002.
- Leuschner, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley and Sons, 1984. 284p.
- Lockwood, C.; Moore, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian Journal of Forest Research**, v.23, p. 468-475. 1993.
- McDill, M. E.; Braze, J. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age-class distributions. **Forest Science**, v.46, p. 423–436. 2000.
- McDill, M. E.; Braze, J. Using the branch and bound algorithm to solve forest planning problems with adjacency constraints. **Forest Science**, v. 47, p. 403–418. 2001.
- Moreira, J. M. M. A. P. **A incorporaç o de corredores de conectividade em problemas de otimiza o para o planejamento de florestas industriais**. 2008. 123f. Disserta o (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2008.
- Mullen, D.S.; Butler, R.M. The design of a genetic algorithm based spatially constrained timber harvest scheduling model, <http://www.for.msu.edu/e4/e4ssaf97.html>. 1997.
- 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.

Murray, A. T. Spatial restrictions in harvest scheduling. **Forest Science**, v.45 (1), p. 45–52. 1999.

Murray, A. T.; Snyder, S. Spatial modeling in forest management and natural resource planning. **Forest Science**, v.46 (2), p. 153–156. 2000.

Nelson, J.; Brodie, J. D. Comparison of 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.

Gadow, K.v., Pukkala, T. (Eds), **Designing Green Landscapes**. Springer series "Managing. Forest Ecosystems" v.15. 2008.

Rodrigues, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 2001. 225f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.

Rodrigues, F. A. **Inclusão das dimensões social e ecológica em planos de manejo para florestas de rápido crescimento**. 2002. 110f. Dissertação (Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba. 2002.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L. Soluções de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando busca tabu. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.5, p.701-713, 2003.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Ribeiro, C. A. A. S. Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.2, p.247-256, 2004a.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Silva, G. F. Metaheurística algoritmo genetic para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.22, n.2, p.233-245, 2004b.

Snyder, S.; ReVelle, C. Temporal and spatial harvesting of irregular systems of parcels. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 26 (6), p. 1079–1088. 1996.

Snyder, S.; ReVelle, C. Dynamic selection of harvests with adjacency restrictions: the SHARe model. **Forest Science**, v. 43, p. 213–222. 1997.

Van Deusen, P. C. Multiple solution harvest scheduling. **Silva Fennica**, v.33(3), p. 1–9. 1999.

Wang, Y.; Zhang, X. A dynamic modeling approach to simulating socioeconomic effects on landscape changes. **Ecological Modelling**, v. 140, p.141–162. 2001.

Weintraub, A.; Jones, G.; Meacham, M.; Magendzo, A.; Magendzo, A.; Malchuk, D. Heuristic procedures for solving mixed-integer harvest scheduling – transportation planning models. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 25, p. 1618–1626. 1995.

CAPÍTULO 3

REGULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FLORESTAS EQUIÂNEAS COM RESTRIÇÃO DE CLASSES DE IDADE POR COMPARTIMENTO

INTRODUÇÃO

Manejo florestal é a arte e a ciência da tomada de decisões considerando a organização, uso e conservação da floresta e dos recursos relacionados tendo como finalidade a produção de madeira, água, manutenção da fauna, recreação ou uma combinação desses fatores (Buongiorno e Gilles, 2003). O processo de regulação florestal consiste em decidir quando, onde, e quanto de madeira será cortada em uma determinada ordem para atingir os objetivos do manejo florestal (Rodrigues, 2001, Buongiorno e Gilles, 2003). A programação matemática é utilizada na formulação e resolução de modelos de regulação florestal, auxiliando na obtenção da melhor solução para o problema em questão (Murray e Church, 1995; Buongiorno e Gilles, 2003; Davis et al., 2005).

Uma empresa florestal é constituída de um mosaico de talhões ou quadras de diferentes idades e tamanhos que podem ser considerados como unidades de manejo. As unidades de manejo são geralmente agrupadas em compartimentos maiores (geralmente chamadas de regiões ou fazendas) devido a fatores climáticos, fisiográficos, ambientais, sociais, culturais, administrativos e econômicos que influenciem na tomada de decisões da equipe de planejamento.

A incorporação de restrições que possibilitem uma maior fidelidade às características ambientais influenciadas pelos plantios florestais é uma realidade para as equipes de planejamento florestal nos dias atuais (Davis et al., 2005). Entretanto, a elaboração destes planos de manejo requer uma interação de fatores ecológicos, espaciais, econômicos e sociais, resultando na consideração de uma quantidade de variáveis que inviabiliza a sua realização sem o auxílio de modernas ferramentas de planejamento (Buongiorno e Gilles, 2003; Davis et al., 2005).

A utilização de características espaciais nos modelos de planejamento é essencial para a incorporação de variáveis ambientais como a manutenção da biodiversidade, a diminuição da erosão e assoreamento de rios e lagos, manutenção de corredores ecológicos, consideração de áreas de corte contínuas, ecologia de paisagem, zonas de amortização e distribuição regular de áreas de corte (Clements et al., 1990; Nelson e Brodie, 1990; Nelson e Finn, 1991; Sessions, 1992; Hof e Joyce, 1993; Daust e Nelson, 1993; Lockwood e Moore, 1993; Yoshimoto e Brodie, 1994; Pukkala et al., 1995; Baskent e Jordan, 1995; Murray e Church, 1995a; Mullen e Butler, 1997; Snyder e ReVelle, 1997; Church et al., 1998; Hoganson e Borges, 1998; Williams, 1998; Öhman e Eriksson, 1998; Boston e Bettinger, 1999; Clark et al., 2000; Richards e Gunn, 2000; Barrett e Gilles, 2000; McDill e Braze, 2000; Richards e Gunn, 2000, 2003; Baskent e Jordan, 2002; Falcao e Borges, 2002; Murray e Weintraub, 2002; Crowe et al., 2003; Caro et al., 2003; Lu e Eriksson, 2000; Weintraub et al., 2000; Nur et al., 2000; Liu et al., 2000; Alonso, 2003; Baskent e Keles, 2005; Castro, 2007; Moreira, 2008).

A inclusão de restrições ambientais se dá principalmente pela imposição de restrições de adjacência, que consistem no controle das interações entre unidades de manejo da floresta, onde atividades de colheita em uma determinada unidade de manejo restringem ações de corte em unidades vizinhas ou adjacentes (Murray e Church, 1995). Estas restrições impedem que grandes áreas de corte contiguas sejam formadas. Existem diferentes formulações de restrições de adjacência através de programação inteira mista (PIM), que se baseiam na formulação de pares entre os vizinhos ou em uma adaptação dessa formulação. A imposição dessas restrições implica em um maior esforço computacional, exigindo, às vezes, muitas horas se não dias para a resolução de problemas com relativamente poucas unidades de manejo através de algoritmos clássicos de programação inteira (McDill e Braze, 2000).

As técnicas de programação matemáticas são muito sensíveis ao número de variáveis de decisão exibindo comportamento explosivo com a incorporação de relações espaciais existentes, causando um aumento exponencial no tempo de processamento (Baskent, 2001). Técnicas heurísticas podem fornecer numerosas soluções factíveis com tempo e esforço computacional razoável (Nelson et al., 1991; Barrett e Gilless, 2000; Murray e Snyder, 2000; Öhman, 2001; Kurttila, 2001; Baskent e Jordan, 2002; Bettinger e Sessions, 2003). Os benefícios do uso dessas técnicas não envolvem somente a capacidade de solução de problemas de grande porte, mas também a simplicidade na formulação do problema (Baskent e Keles, 2005). Dentre as metaheurísticas destacam-se: simulação de Monte Carlo, *simulated annealing*, busca tabu, e algoritmos genéticos. Esta última destaca-se pela facilidade de implementação e maior velocidade de processamento (Muller e Butler, 1997; Lu e Eriksson, 2000).

O objetivo desse estudo foi de implementar modelos de regulação florestal considerando não somente a interação entre as unidades de manejo, mas também a distribuição das áreas de corte dentro de cada compartimento da floresta.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição dos dados

Dados para um estudo de caso foram obtidas de uma fazenda modelo, que representa uma situação encontrada em uma dada empresa florestal de Minas Gerais. A área total da fazenda modelo é de 9.750 ha, sendo que 35 % (3.412 ha) de efetivo plantio e o restante da área constitui-se em reserva legal e áreas de preservação permanente (Figura 3.1). Ela foi dividida em 135 unidades de manejo em função de características administrativas, edafoclimáticas e fisiográficas. A área média de cada unidade de manejo é de 25 ha. A disposição das unidades de manejo e de classes de idade atual é apresentada na Figura 3.2. As unidades de manejo foram agrupadas em dois compartimentos com características distintas (Figura 3.3).

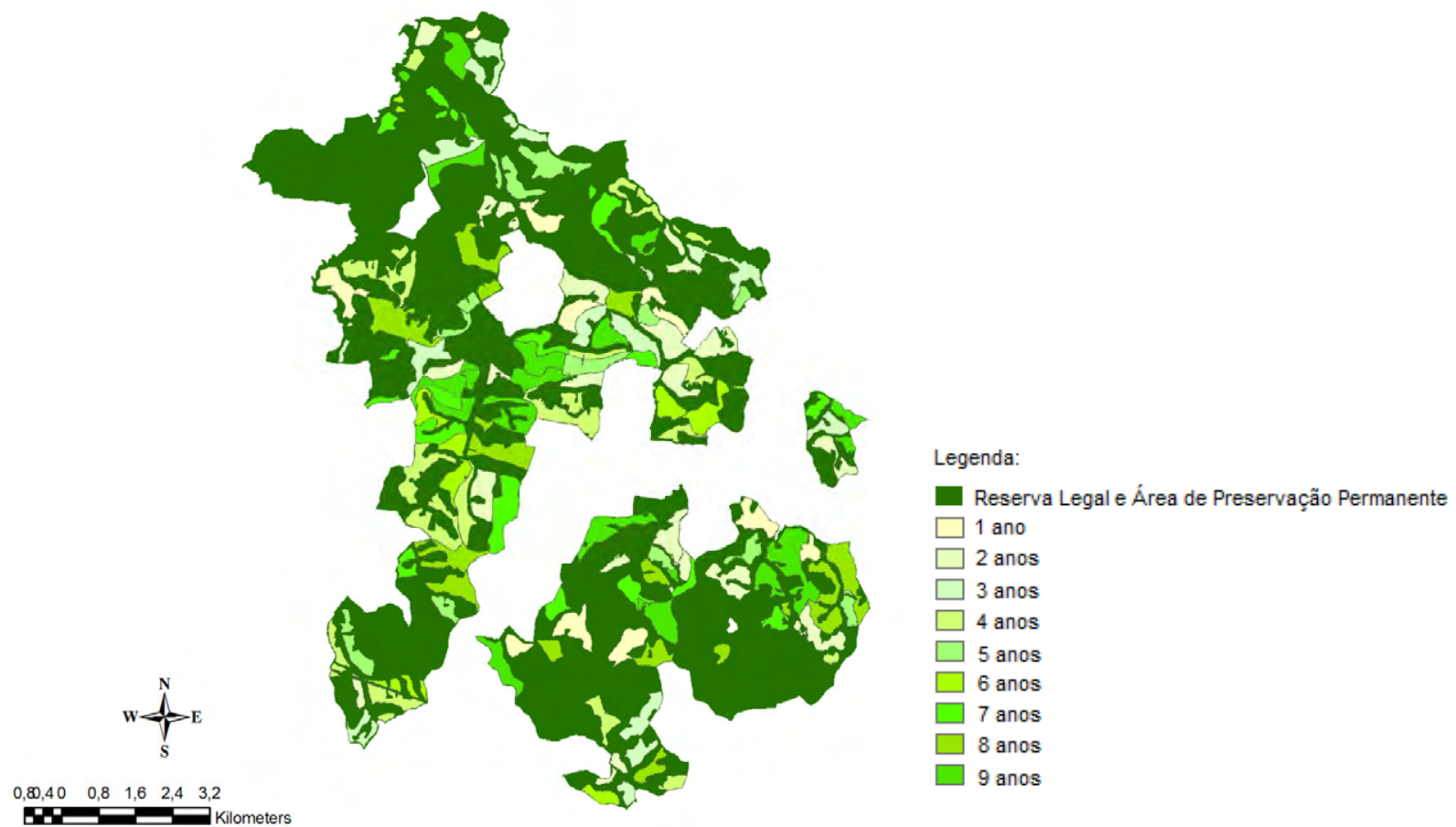


Figura 3.1: Distribuição espacial de classes de idade das áreas da fazenda modelo.

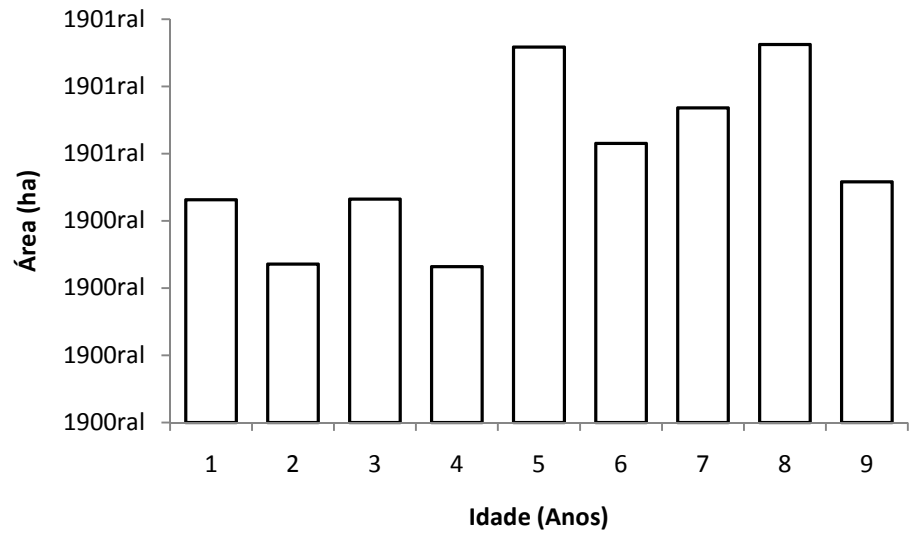


Figura 3.2: Distribuição inicial de classes de idade das áreas da fazenda modelo utilizada.

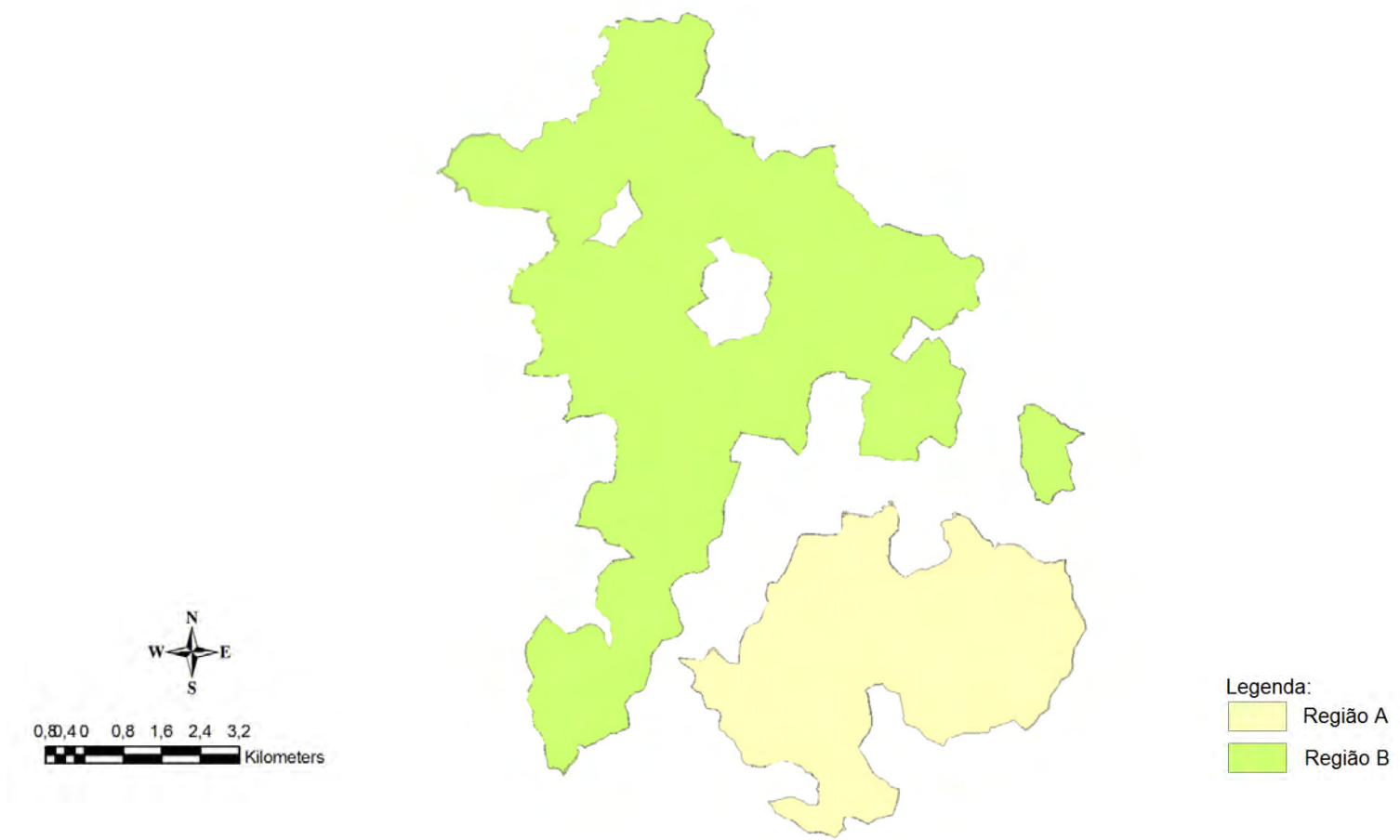


Figura 3.3: Forma de agrupamento das unidades de manejo na fazenda estudada, representando a divisão em compartimentos (A e B).

Modelos matemáticos

O modelo de regulação foi formulado empregando o sistema de planejamento florestal otimizado *SifPlan* (www.treeSoftware.com.br). A abordagem utilizada para a geração de unidades de manejo foi o modelo I descrita em Johnson e Scheurman (1977), com a utilização de variáveis binárias para as variáveis decisórias, resultando em:

Função Objetivo:

$$MAX Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \geq Dmin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \leq Dmax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^{IR} A_{lk} = \left(\frac{Área\ total}{IR} \right) \quad \{k = H - 1\} \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

em que Z = Valor Presente Líquido Global (R\$); x_{ij} = variáveis de decisão, representando a j -ésima alternativa de manejo adotada na i -ésima unidade de manejo; c_{ij} = Valor Presente Líquido de cada unidade de manejo i , manejada segundo a alternativa de manejo j ; m = número total de unidades de manejo; n = número total de alternativas de manejo na i -ésima unidade de manejo; V_{ijk} = volume (m^3) produzido pela i -ésima unidade de manejo quando a j -ésima alternativa de manejo é adotada, para o período k ; $Dmin_k$ e $Dmax_k$ = demanda volumétrica (m^3) mínima e máxima respectivamente, em cada período do horizonte de planejamento; A_{lk} representa a área do povoamento na idade l e período k ; e IR idade regulatória.

De acordo com esse modelo de programação inteira mista, a maximização do valor presente global (1) está sujeita às restrições de singularidade (2) e (6) e às produções mínima (3) e máxima (4), em cada período do horizonte de planejamento. A restrição (5) garante o estabelecimento da regulação florestal. Definiu-se o horizonte de planejamento como de 1,5 ciclos, conforme sugerido por Leuschener (1984), sendo a rotação de 6 anos, o horizonte de planejamento foi de 18 anos.

As intervenções nos povoamentos incluíram corte seguido de imediata reforma ou corte com reforma no próximo período, o que significa que apenas um regime de manejo (alto-fuste) foi avaliado. Possibilitou-se a variação da idade de corte entre 5 a 9 anos, dentro do horizonte de planejamento. Utilizou-se como idade regulatória a idade de 6 anos. Para fins de comparação, obteve-se o mesmo modelo sem a inclusão das restrições de adjacência e restrições de classes de idade por compartimento.

Restrição de Classes de Idade por Compartimento

A formulação dessa restrição constituiu na exigência de áreas em classes de idade iguais em cada compartimento da floresta. O início da aplicação da restrição ocorreu em diferentes anos do horizonte de planejamento, variando entre o sétimo e o último ano do horizonte de planejamento.

$$\sum_{i=1}^n A_{lk} = \left(\frac{At_q}{\sum_{l=1}^n l} \right) \quad \{k = 7, 8, \dots, H - 1\} \quad (7)$$

em que, A_{lk} representa as áreas de cada unidade de manejo na idade l e período k ; e At_q representa a área total do compartimento q .

Restrição de adjacência

Devido à topografia muito acidentada da área de estudo, as unidades de manejo foram consideradas adjacentes quando a distância entre seus limites (bordas) apresentava-se menor ou igual a 50 m. A restrição de adjacência para evitar o corte de unidades de manejo adjacentes foi:

$$n_i x_{ij} + \sum_{i \in N_i} x_{ij} \leq n_i \quad \forall i, k \quad (6)$$

em que n_i refere-se ao número de unidades de manejo adjacentes que apresentam cortes no período k (McDill e Braze, 2000).

Algoritmo genético

O AG foi implementado em uma rotina computacional utilizando o ambiente de programação *Visual Basic for Applications* em conjunto com o Software Excel. As soluções (indivíduos) geradas para o problema em questão apresentaram o formato de um vetor $V(x) = \{X_{11}, X_{12}, \dots, X_{ij}\}$, onde a variável de decisão X_{ij} ($X_{ij} \in \{0,1\}$), simboliza a alternativa de manejo j ($j=1,2,\dots,n$) assinalada à unidade de manejo i ($i=1,2,\dots,m$) (Rodrigues et al., 2004).

A função de aptidão do algoritmo genético empregado nesse trabalho baseia-se na aplicação de penalidades a função objetivo, que consiste em maximizar o valor presente líquido global (vpl). As penalidades impostas referem-se à variação volumétrica acima ou abaixo da demanda proposta, áreas com cortes adjacentes e, distribuição de classes de idades irregular ao final do horizonte de planejamento. A função de *fitness* pode ser apresentada como a seguir:

$$Max = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \alpha (H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij})^2 - \beta (A_l - \sum_{q=1}^2 \sum_{k=7}^{H-1} \sum_{l=1}^n A_{lkq})^2 - \gamma (A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i)^2$$

em que, Z = valor da função de aptidão; x_{ij} = variáveis de decisão, representando a j -ésima alternativa de manejo adotada na i -ésima unidade de manejo; c_{ij} = valor presente líquido de cada unidade de manejo i , manejada segundo a alternativa de manejo j ; m = número total de unidades de manejo; n = número total de alternativas de manejo na i -ésima unidade de manejo; V_{ijk} = volume (m^3) produzido pela i -ésima unidade de manejo quando a j -ésima alternativa de manejo é adotada, para o período k ; H_k = demanda volumétrica (m^3), em cada período do horizonte de planejamento; α , β e γ são os coeficiente de penalidade associados a cada restrição; A_{lkq} refere-se a áreas do compartimento q cortadas no período k ; A_l = área regulatória e A_i = área da unidade de manejo i .

A população inicial do AG foi constituída de 30 indivíduos gerados aleatoriamente, considerando a viabilidade de cada solução pela restrição de singularidade. Utilizou-se o *crossover* de múltiplos pontos e uma taxa de mutação em torno 0,6% para cada indivíduo da população. A seleção de indivíduos ocorreu por elitização. A parada do processo iterativo corrida do algoritmo ocorreu quando, após a estabilização do *fitness*, o AG realizou 20 novas gerações.

Produção, receita e custo

Considerou-se somente o plantio de um clone híbrido (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) como sendo a única fonte de madeira utilizada pela empresa. A curva de produção obtida a partir de dados de parcelas de inventário florestal e utilizada neste estudo foi:

$$Volume = \frac{485,68}{1 + 7,4275 e^{-0,4062 Idade}}$$

A taxa de juros utilizada foi de 8,75% ao ano e o valor de venda da madeira foi de R\$ 80,00/m³. Valores de custo das atividades florestais foram apresentados na Tabela 3.1. O custo de colheita foi calculado em função da produtividade, através da expressão $Custo (R\$/m^3) = 37,59 \text{ Produtividade}^{-0,035}$.

Tabela 3.1: Custos empregados para a avaliação econômica dos modelos de regulação.

Ano	Atividade	Rendimento (Un/ha)	Unid.	Custo Unitário	Aplicação (%)	Total (R\$/ha)
1º ano	Adução Manual (Calcário)	20,00	hh	14,73	100%	294,58
1º ano	Adução NPK 06-10-29	13,00	hh	14,34	100%	186,47
1º ano	Adução NPK 06-30-06	10,00	hh	12,40	100%	123,95
1º ano	Ajudante Florestal	20,00	hh	11,39	100%	227,74
1º ano	Alinhamento/Marcação	10,00	hh	11,39	100%	113,87
1º ano	Capina Química Manual Total	1100	hh	14,51	80%	127,68
1º ano	Capina Química Mecânica Total	0,95	hh	88,26	20%	16,77
1º ano	Combate à Formiga Sistemático	3,50	hh	11,93	100%	41,75
1º ano	Combate à Formiga convencional	8,00	hh	11,93	10%	104,97
1º ano	Coveamento Motorizado	17,00	hh	22,99	80%	312,63
1º ano	Irrigação Caminhão Pipa	16,00	hh	18,57	100%	297,18
1º ano	Limpeza Manual	80,00	hh	11,39	30%	273,29
1º ano	Operador de Motosserra	2,00	hh	27,69	100%	55,38
1º ano	Planificação	5,00	hh	80,00	0%	-
1º ano	Plantio c/ Gel	17,00	hh	16,71	100%	284,00
1º ano	Replanteio c/ Gel	7,00	hh	16,71	100%	116,94
1º ano	Roçada Manual	30,00	hh	11,39	70%	239,13
1º ano	Subsolagem/Fosfatagem	1,50	hh	135,70	20%	40,71
1º ano	Calcário	1,50	t	59,94	100%	89,91
1º ano	Cupinicida	0,03	kg	845,13	100%	27,89
1º ano	Formicida	8,00	kg	4,27	10%	37,58
1º ano	Frete Mudanças / Insumos	100	ha	132,00	100%	132,00
1º ano	Gel	3,00	kg	6,69	100%	20,07
1º ano	Herbicida	6,00	l	9,53	100%	57,18
1º ano	Map	0,33	kg	1,35	100%	0,45
1º ano	Mudas	120	mil	23140	100%	2777,71
1º ano	NPK 06-10-29	0,40	t	949,95	100%	379,98
1º ano	NPK 06-30-06	0,12	t	939,71	100%	113,57
1º ano	Topografia	100	ha	65,67	100%	65,67
2º Ano	Adução NPK 06-10-29	13,00	hh	14,34	100%	186,47
2º Ano	Ajudante Florestal	10,00	hh	11,14	100%	111,40
2º Ano	Capina Química Manual Total	15,00	hh	14,51	100%	217,64
2º Ano	Combate à formiga convencional	6,00	hh	11,93	10%	78,73
2º Ano	Construção Manual de Aceiro	200,00	hh	11,39	10%	227,74
2º Ano	Coroamento	16,00	hh	11,39	100%	182,19
2º Ano	Roçada Manual - Pós-Plantio	16,00	hh	11,39	100%	182,19
2º Ano	Formicida	7,00	kg	4,27	10%	32,88
2º Ano	Herbicida	3,00	l	9,53	100%	28,59
2º Ano	NPK 06-10-29	0,40	t	949,95	100%	379,98
3º Ano	Capina Química Manual Total	13,00	hh	14,51	100%	188,62
3º Ano	Combate à Formiga Convencional	6,00	hh	11,93	10%	78,73
3º Ano	Manutenção Manual de Aceiro	200,00	hh	11,39	10%	227,74
3º Ano	Roçada manual	16,00	hh	11,39	100%	182,19
3º Ano	Formicida	5,00	kg	4,27	10%	23,49
3º Ano	Herbicida	6,00	kg	9,53	100%	57,18
4º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
4º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
5º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
5º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
6º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
6º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
7º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
7º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
Total						6.797,33

Avaliação da dispersão das intervenções nas unidades de manejo

Entre as diversas métricas utilizadas para avaliação do manejo da paisagem encontradas na literatura (Baskent e Jordan, 1995), optou-se por avaliar o efeito da restrição de adjacência, pela média ponderada do inverso da menor distância ao quadrado entre unidades de manejo cortadas no mesmo período, pelas áreas ao quadrado das unidades de manejo que sofrem intervenção. Quando menor o valor apresentado pelo IAC, melhor ambientalmente será o plano de manejo. O índice utilizado foi:

$$IAC = \frac{\sum_{k=0}^{H-1} \sum_{i=1}^m A_i^2 \left(\frac{1}{d_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^m A_i}$$

em que, IAC = índice de área de colheita, A_i = área da unidade de manejo i com intervenção, em hectares, d_i = distância até a unidade de manejo mais próxima com intervenção, em quilômetros.

RESULTADOS

A formulação do modelo de regulação resultou em um modelo com 8.755 variáveis decisórias. As formulações das restrições de adjacência resultaram em 37.555 restrições. As restrições formuladas via classes de idade por compartimento resultaram em 66 restrições quando a aplicação ocorre no sétimo ano e seis restrições com a aplicação no último ano do horizonte. O tempo de processamento para o modelo com restrição de adjacência em relação aos modelos com as restrições formuladas por classes de idade e compartimento aumentou em cerca de 50 % sendo que não houve diferença na resolução entre as diferentes formas de aplicação das restrições por compartimento.

A variação da produção volumétrica dos modelos de regulação é apresentada na Figura 4. A imposição das restrições de adjacência reduziu o VPL global, em torno de 8 %, sendo que a redução do VPL global pela exigência de classes de idade iguais foi de 5 % no sétimo ano apresentando um aumento gradual até o último ano como apresentado na Figura 3.5. O valor da função objetivo para os modelos com e sem a inclusão das restrições de adjacência foi de R\$ 17.143.857,18 e R\$ 18.599.169,38 respectivamente e de R\$ 17.523.154,00 para o sétimo ano com a exigência de classes de idade constante.

O valor do IAC para o modelo com e sem a inclusão da restrição de adjacência foi de 0,246436 e 0,615032, respectivamente. A dinâmica do índice com relação ao ano de imposição das restrições de classes de idade apresentou uma tendência de redução do índice com o passar dos anos, sendo o menor valor de 0,4137034 obtido no oitavo ano. A variação do IAC apresenta tendência de aumento com o passar

dos anos onde a restrição é implementada. A variação do IAC é apresentada na Figura 3.6.

A distribuição espacial das unidades de manejo que sofreram intervenção para a proposta de modelagem com restrições a partir do sétimo ano é apresentada na Figura 3.5, juntamente com o modelo clássico e com adjacência.

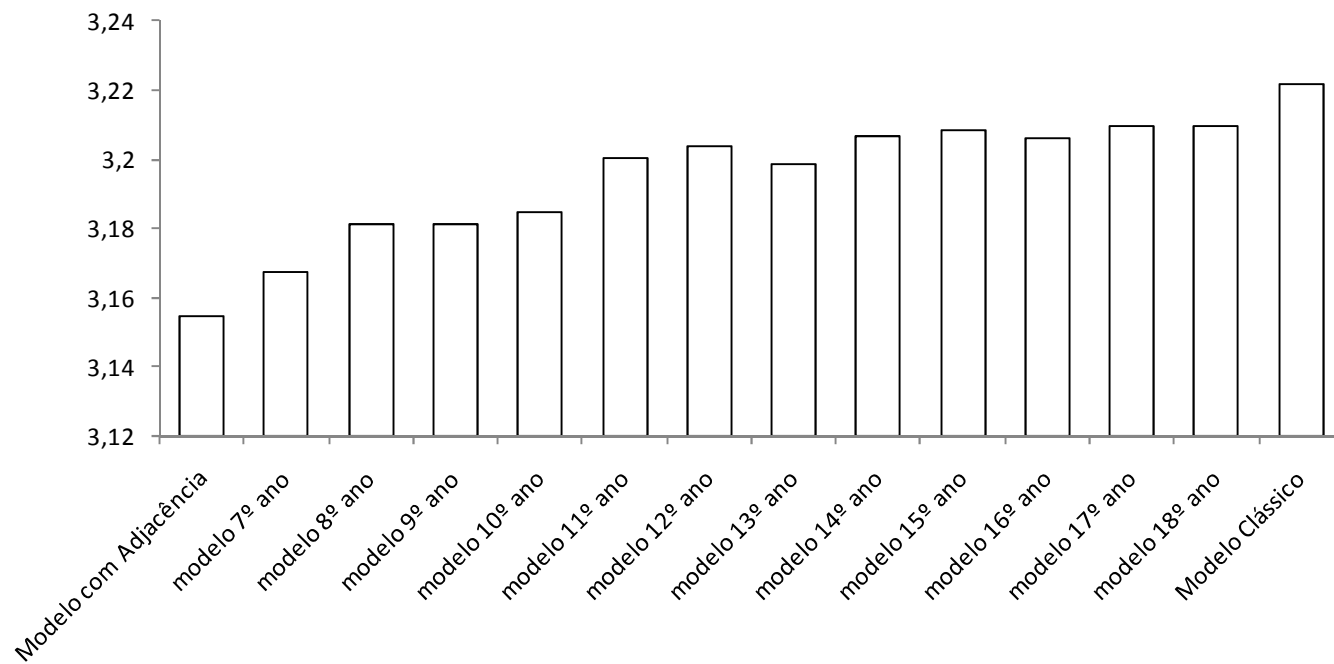


Figura 3.4: Volume produzido em milhões de m³ durante todo o horizonte de planejamento para cada modelo.

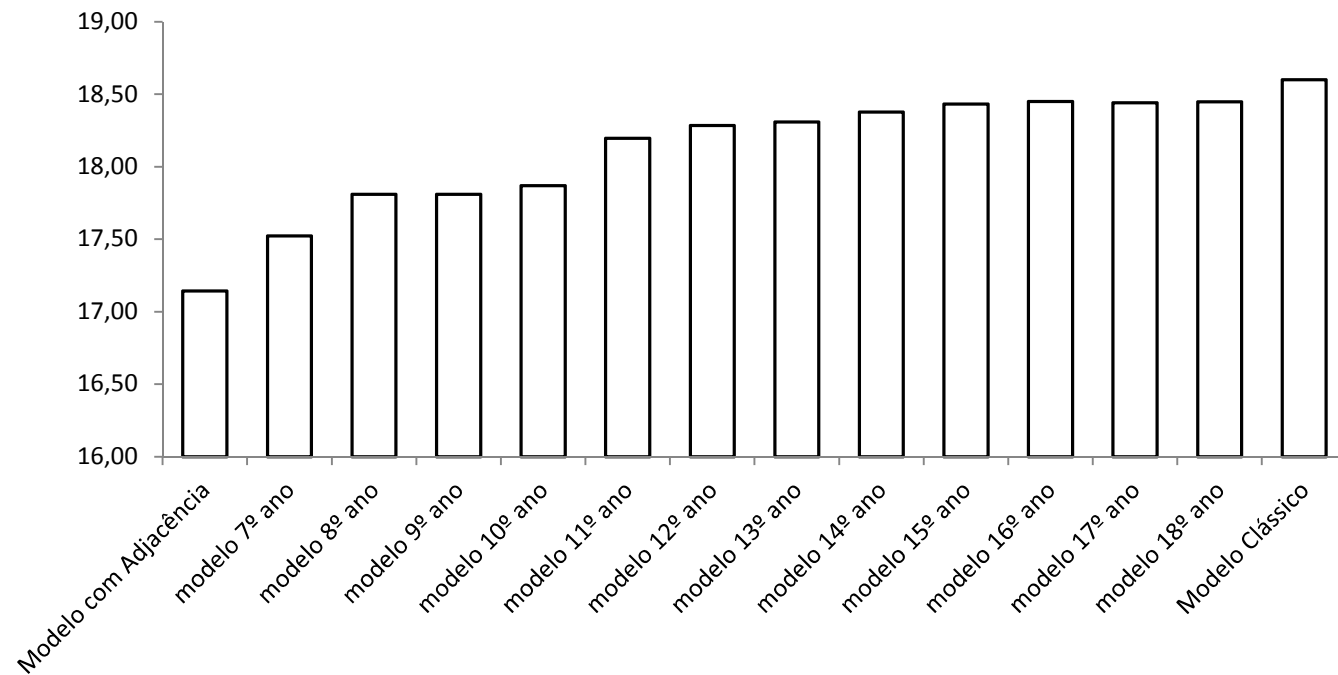


Figura 3.5: Valor presente líquido global em milhões de reais, apresentado por cada forma de modelagem.

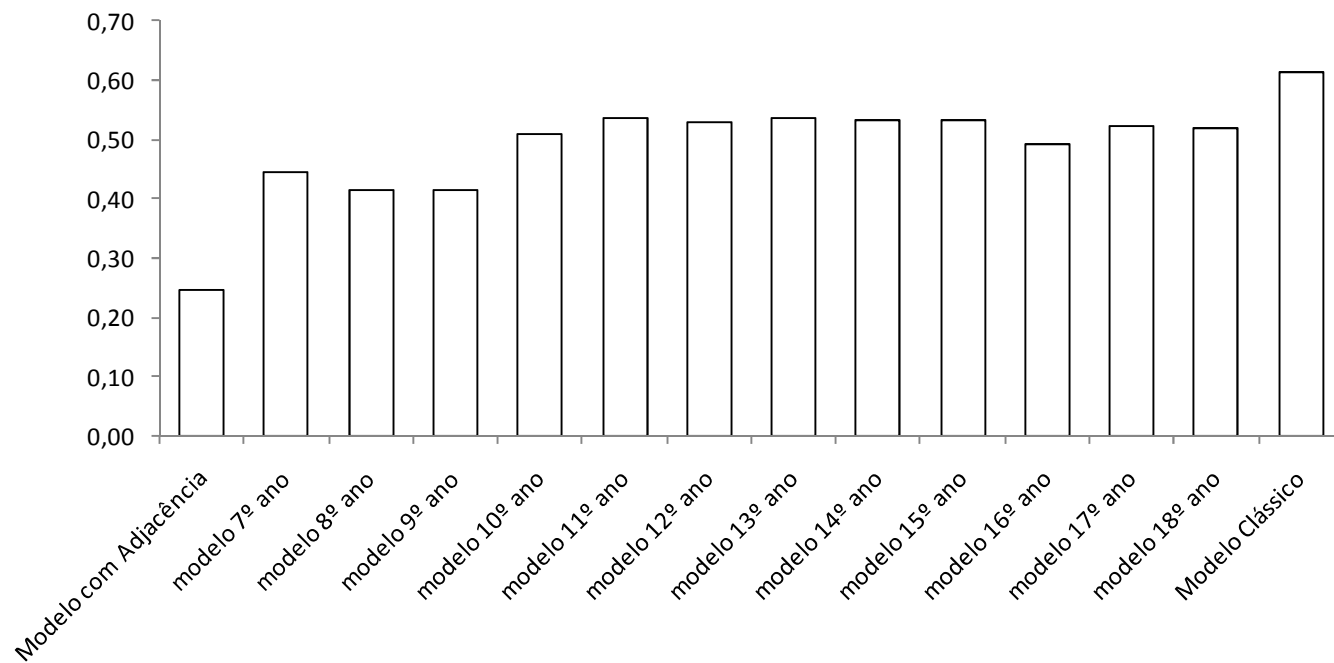
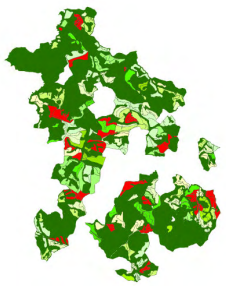





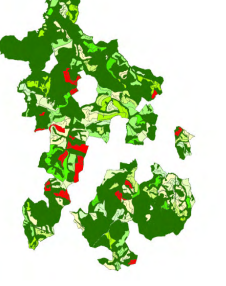
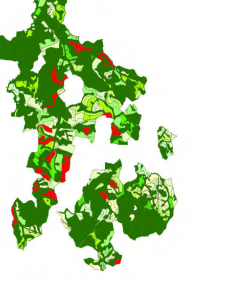
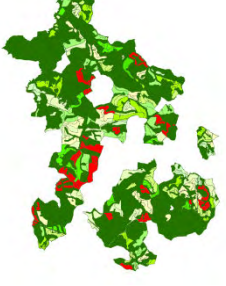
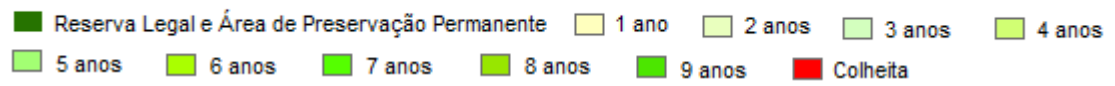
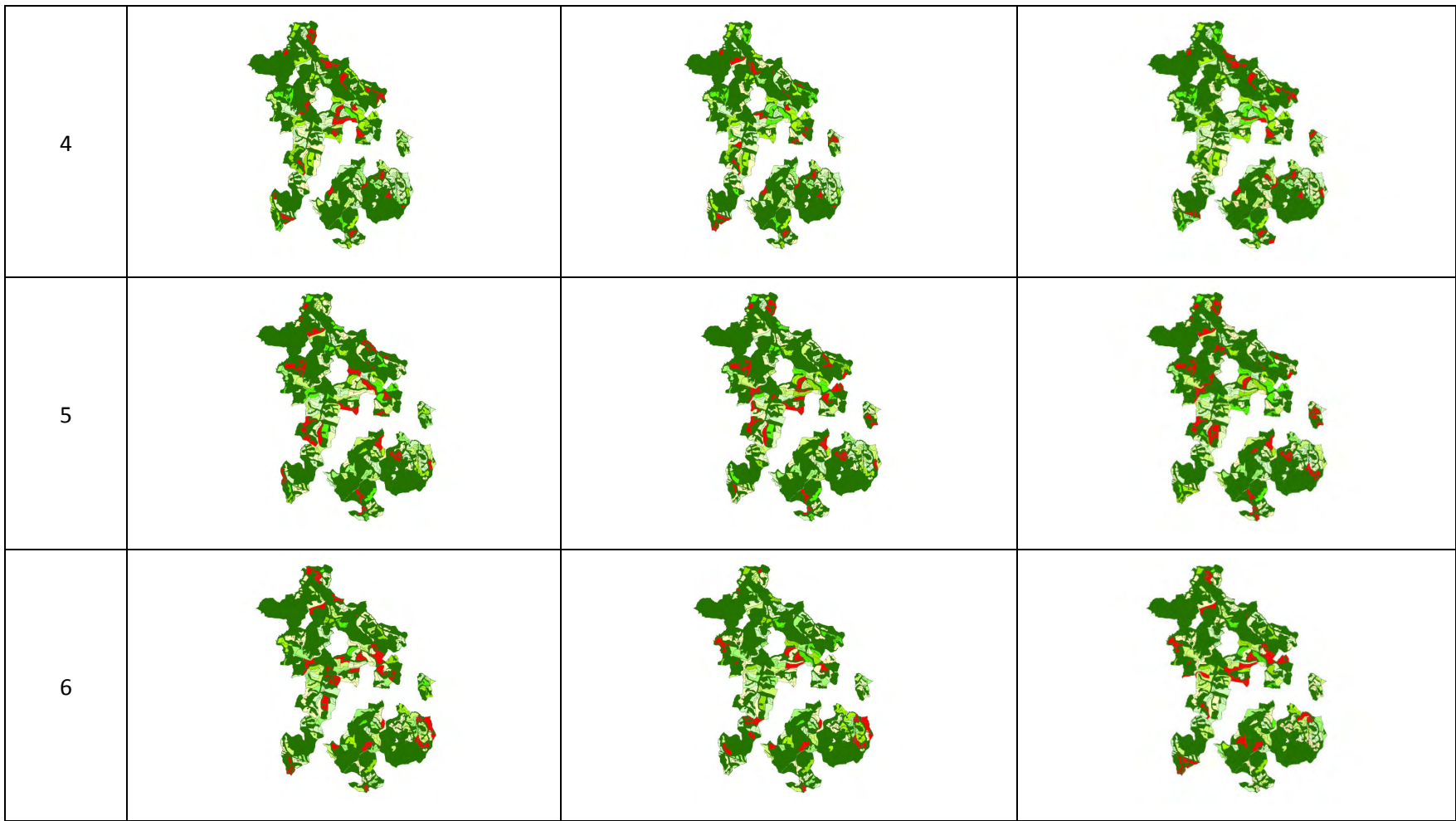


Figura 3.6: Variação do Índice de área de colheita (IAC) em função da imposição de restrição por compartimento em diferentes anos do horizonte de planejamento.

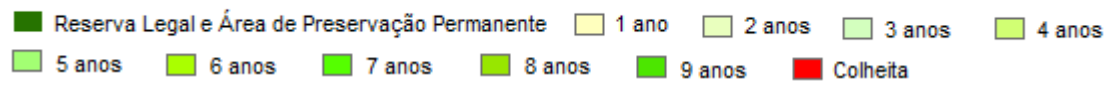
Período	Sem Restrição de Adjacência	Com restrição de Adjacência	Proposta 7º ano
1			
2			
3			

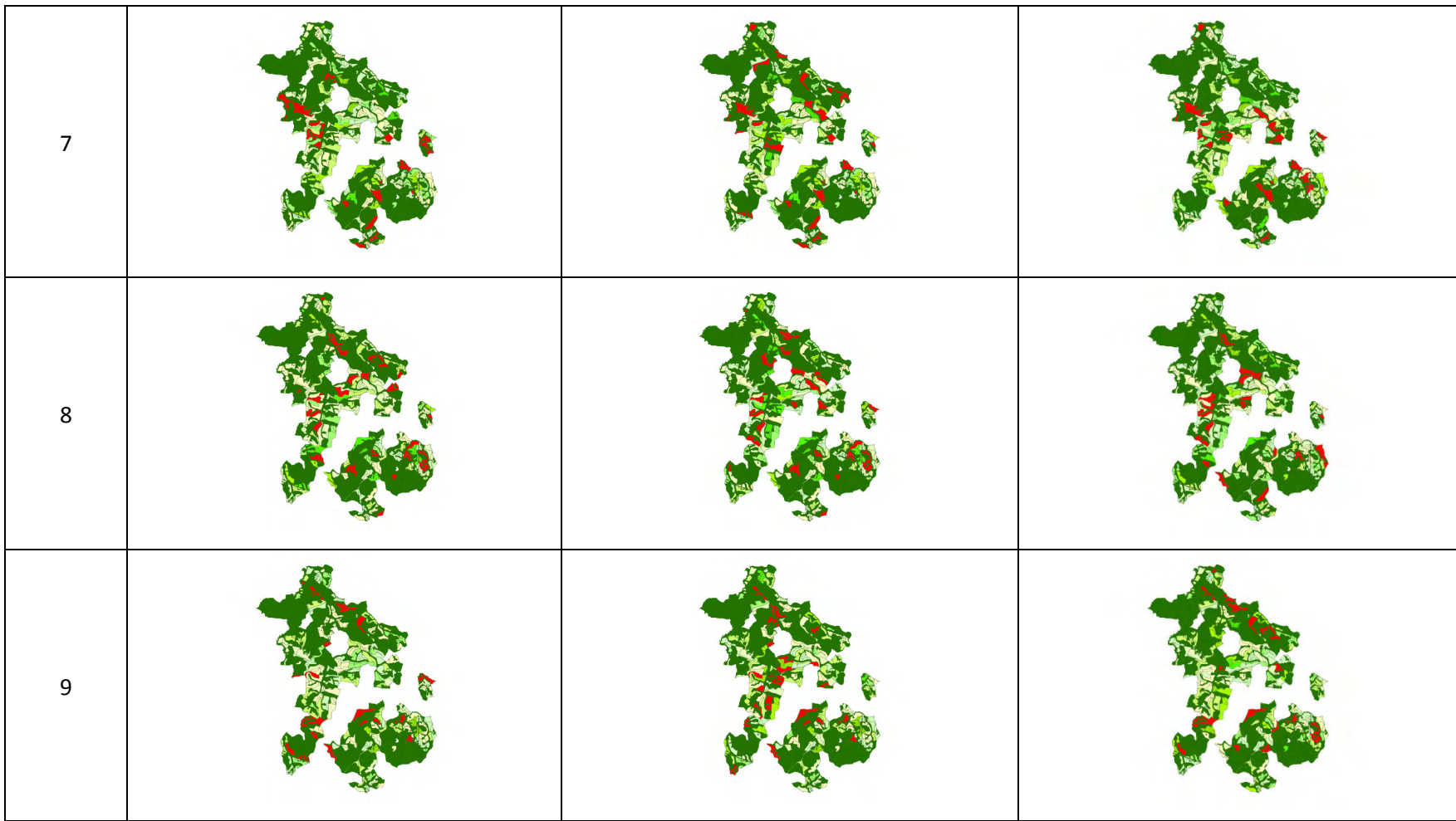
Legenda:



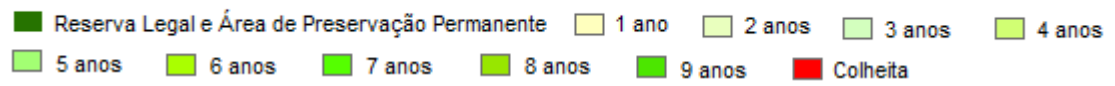


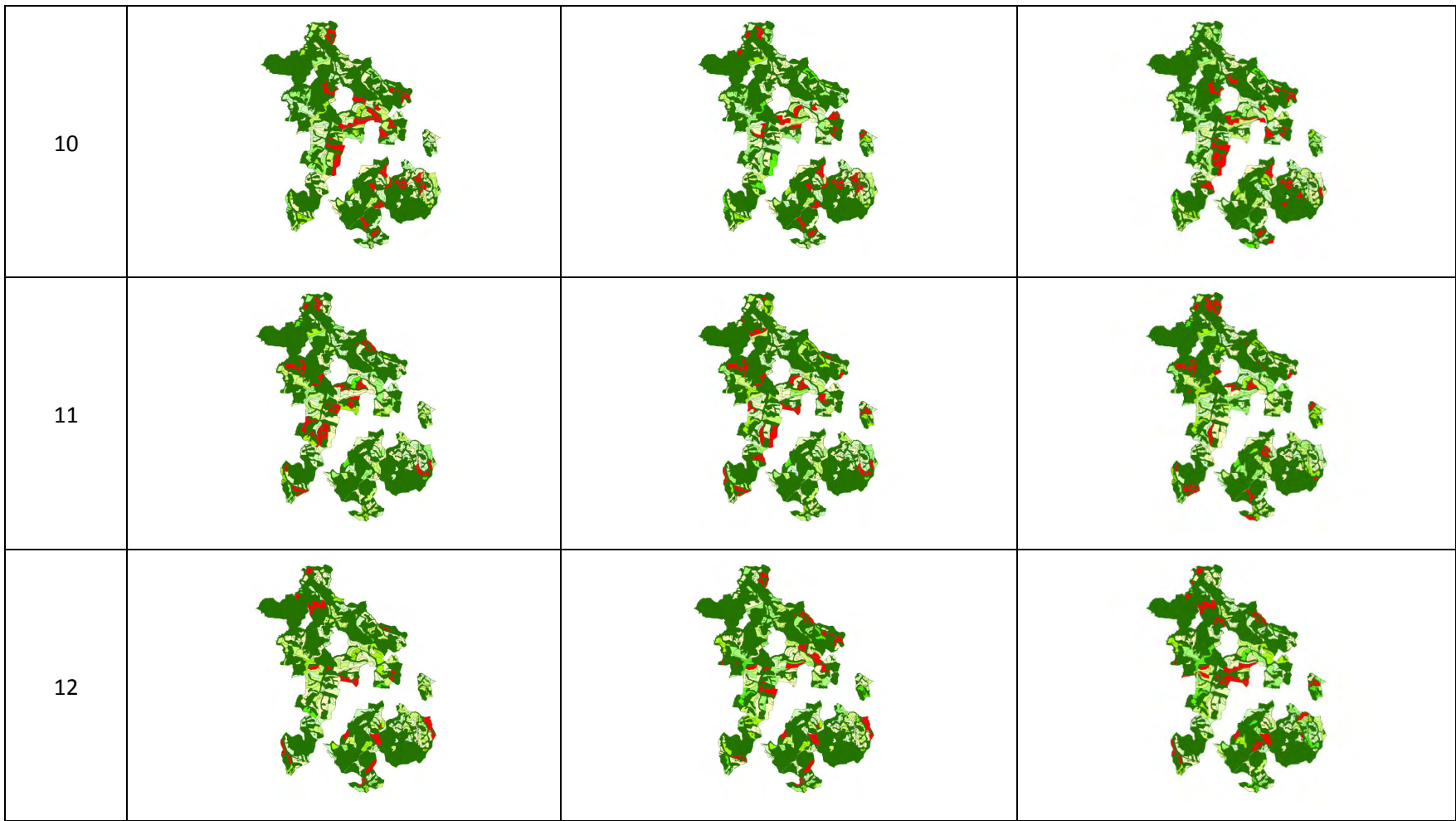
Legenda:



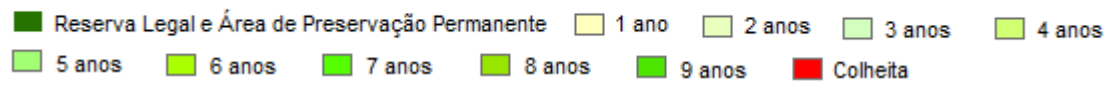


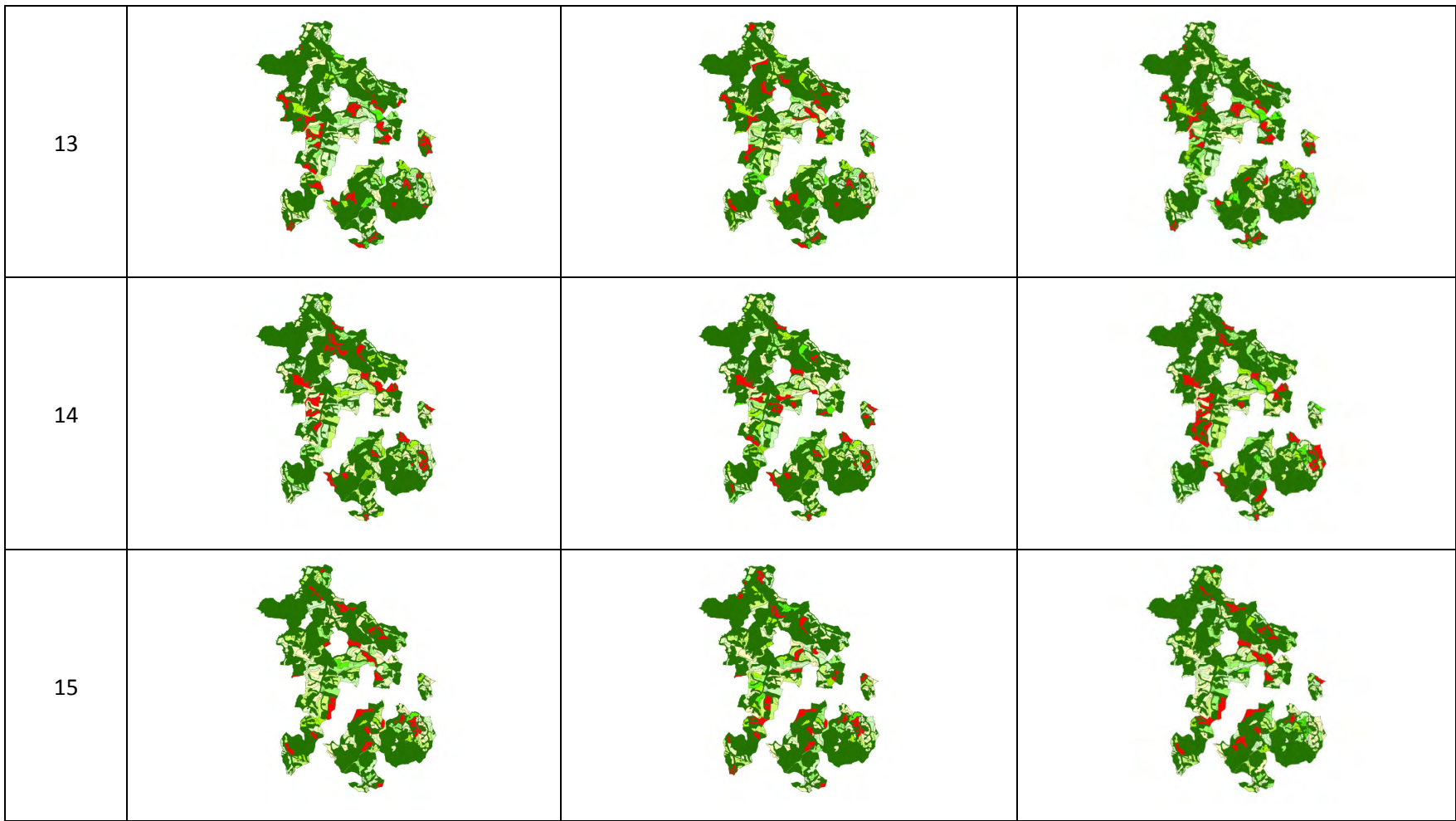
Legenda:



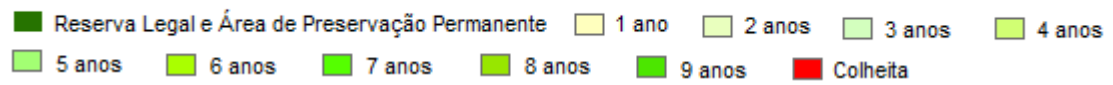


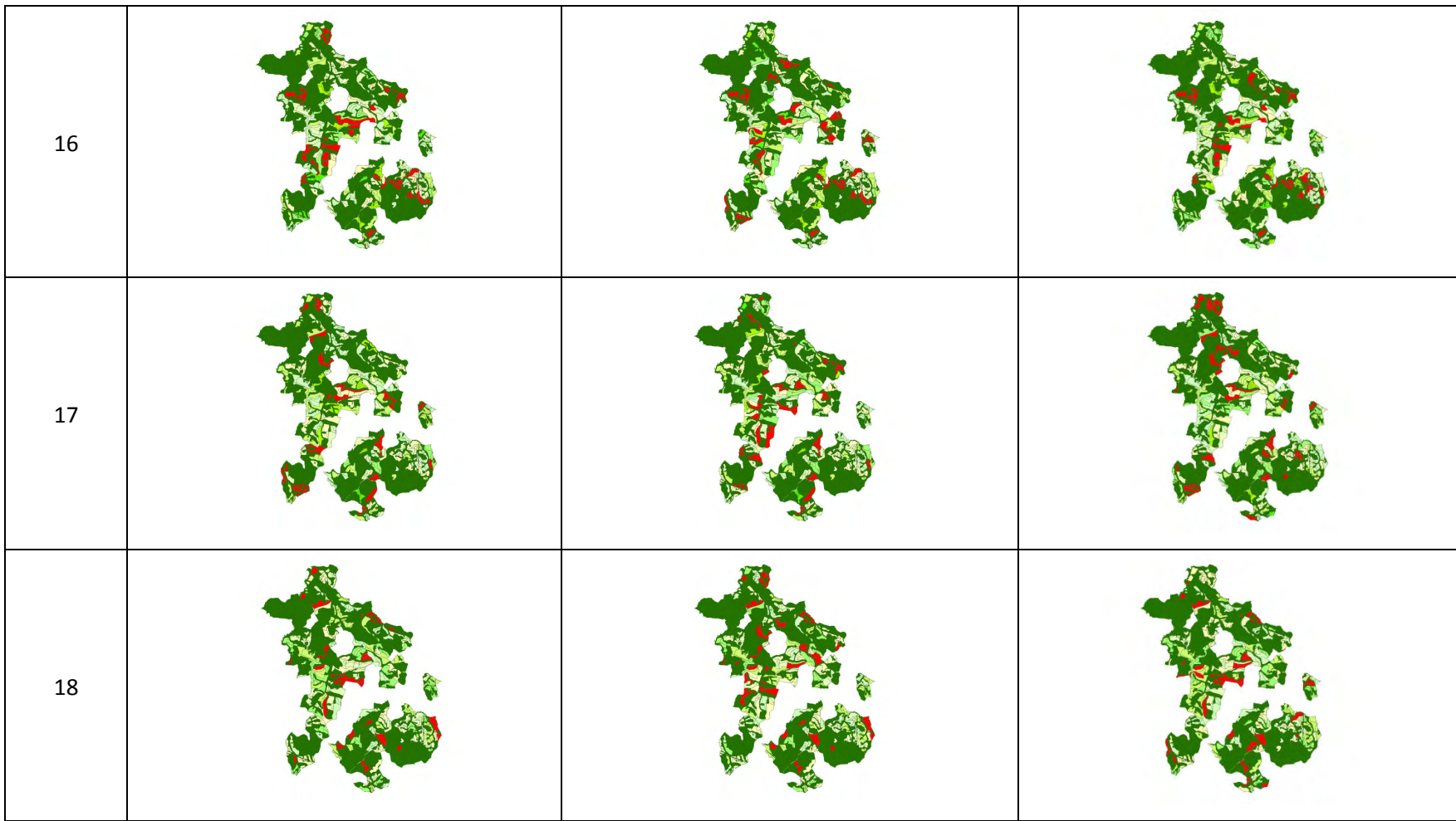
Legenda:





Legenda:





Legenda:

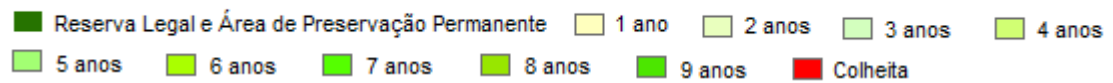


Figura 3.5: Distribuição espacial das classes de idade do modelo com adjacência, proposta com restrição ao sétimo ano e o modelo de regulação clássica.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O sucesso do planejamento das atividades florestais depende de quão precisamente o modelo de regulação representa os objetivos e as expectativas dos proprietários florestais, características ambientais e sociais do empreendimento e as relações entre as diferentes entradas e saídas do sistema de produção (Pukkala, 2002).

Aspectos espaciais são cada vez mais importantes no planejamento florestal, principalmente devido à crescente importância das questões ambientais. Na otimização espacial, as relações entre talhões vizinhos está integrada no modelo de planejamento, e a disposição espacial dos recursos é produzida durante a otimização (Kurttila, 2001; Heinonen, 2007).

A consideração das relações espaciais é geralmente implementada em modelos de regulação florestal, considerando diferentes aspectos, área máxima de corte (O'Hara et al., 1989; Clements et. al., 1990; Nelson e Brodie, 1990; Boston e Bettinger, 1999; Barrett e Gilles, 2000) qualidade visual (Pukkala et al., 1995), conectividade (Williams, 1998, Moreira, 2008), adjacência (Alonso, 2003; Castro, 2007, Moreira, 2008).

A aplicação de restrições espaciais influencia negativamente no valor da função objetivo. Daust e Nelson (1993), encontraram reduções de até 29% do volume produzido com a aplicação de restrições de adjacência (*green-up*), quando comparadas com a solução típica de programação linear. Yoshimoto e Brodie (1994) obtiveram uma redução de 40% do VPL com a aplicação deste mesmo tipo de restrição. Castro (2007) observou uma redução de cerca de 6% para o valor de VPL global. Neste estudo obtivemos uma redução de 8 % com a aplicação da restrição de adjacência clássica, a imposição das restrições de distribuição de idades por comparti-

mento reduziu em 5 % o valor de vpl global sendo que o efeito tende a aumentar com a imposição da restrição em anos posteriores do horizonte de planejamento.

A variação volumétrica observada na Figura 4 demonstra que a produção volumétrica tende a diminuir com o aumento da intensidade da imposição das restrições; isso ocorre, pois a imposição das restrições tende a aumentar a idade média de corte pela diminuição do número de intervenções na floresta.

Pela avaliação do IAC a implementação das restrições apresenta um efeito benéfico para o manejo da paisagem, sendo que a imposição da restrição em anos mais próximos do início do horizonte apresenta tendência de melhoria ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, L. R. L. **O problema da consideração de restrições de adjacência em um planejamento florestal**. 2003. 114f. Dissertação(Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- Barrett, T. M.; Gilles, J. K. Even-aged restrictions with subgraph adjacency. **Ann. Operat. Res.** v.95, p. 159–175. 2000.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Characterising spatial structure of forest landscape. **Canadian Journal of Forest Research**, v.25, p.1830-1849. 1995.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Forest landscape management modelling using *simulated annealing*. **Forest Ecology and Management**, v. 165 p.29-45. 2002.
- Baskent, E. Z.; Keles, S. Spatial Forest Planning: A review. **Ecological Modelling**, v.188, p. 145-173. 2005.
- Baskent, E. Z. Combinatorial optimization in forest ecosystem management modeling. **Turk. Journal Agric. Forest**, v. 25, p. 187–194. 2001.
- Bettinger, P.; Sessions, J. Spatial forest planning: to adopt, or not to adopt? **Journal of Forestry**, v. 101(2), p. 24–29. 2003.
- Boston, K.; Bettinger, P. An analyses of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems. **Forest Science**, v.45 (2), p. 292–301. 1999.
- Buongiorno, J.; Gilles, J. K. **Decision methods for forest resource management**. San Diego, CA: Academic Press.. 2003. 439p.

Caro, F.; Constantino, M.; Martins, I.; Weintraub, A. A 2- opt tabu search procedures for the multiperiod forest harvesting problem with adjacency, green-up, old growth, and even flow constraints. **Forest Science**, v.49 (5), p. 738–751. 2003.

Castro, R. R. **Regulação de Florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

Murray, A., Church, R. Heuristic solution approaches to operational forest planning problems. **Operation research Spektrum**, v.17, p.193-203, 1995.

Church, R. L.; Murray, A. T.; Weintraub, A. Locational issues in forest management. **Location Science** v.6, p.137–153. 1998.

Clark, M. M.; Meller, R. D.; McDonald, T. P. A three stage heuristic for harvest scheduling with access road network development. **Forest Science**, v.46, p. 204–218. 2000.

Clements, S. E.; Dallein, P. L.; Jamnick, M. S. An operational spatially constrained harvest scheduling model. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 20, p. 1438-1447. 1990.

Crowe, K.; Nelson, J.; Boyland, M. Solving the area-restricted harvest scheduling model using the branch and bound algorithm. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33, p. 1804–1814. 2003.

Dahlin, B.; Sallnäs, O. Harvest scheduling under adjacency constraints – a case study from the Swedish sub-alpine region. **Scandinavian Journal of Forest Research** 8: 281–290. 1993.

Daust, D. K.; Nelson, J. D. Spatial reduction factors for strata-based harvest schedules. **Forest Science**, v. 39 (1), p. 152–165. 1993.

Davis, L. S.; Johnson, K. N.; Bettinger, P.; Howard, T. E. **Forest Management: to Sustain Ecological, Economic, and Social Values**. McGraw-Hill Companies Inc, 2005. 804 p.

Falcão, A. O.; Borges, J. Combining random and systematic search heuristic procedures for solving spatially constrained forest management scheduling models. **Forest Science**, v. 48(3), p. 608-621. 2002.

Heinonen, T. Developing spatial optimization in forest planning. Dissertations Forestales 34f. Faculty of Forestry, University of Joensuu. 2007.

- Hof, J.; Joyce, L. A. A mixed integer linear programming approach for spatially optimizing wildlife and timber in managed forest ecosystem. **Forest Science**. v.39 (4), p.816–834. 1993.
- Hoganson, H.; Borges, J. Using dynamic programming and overlapping subproblems to address adjacency in large harvest scheduling problems. **Forest Science**, v. 44, p. 526–538. 1998.
- Kurttila, M. The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning—a landscape ecological perspective. **Forest Ecology and Management**, v.142(1-3), p. 129-142. 2001.
- Leuschner, W. A. Introduction to forest resource management. New York: John Wiley and Sons, 1984. 284p.
- Liu, G.; Nelson, J.D.; Wardman, C.W. A target-oriented approach to forest ecosystem design-changing the rules of forest planning. **Ecology. Modelling**, v.127, p. 269–281. 2000.
- Lockwood, C.; Moore, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 23, p. 468-475. 1993.
- Lu, F.; Eriksson, K.O., Formation of harvest units with genetic algorithms. **Forest Ecology and Management**, v. 130, p.57–67. 2000.
- McDill, M. E.; Braze, J. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age-class distributions. **Forest Science**, v.46, p. 423–436. 2000.
- Moreira, J. M. M. A. P. **A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais**. 2008. 123f. Dissertação (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2008.
- Mullen, D.S.; Butler, R.M. The design of a genetic algorithm based spatially constrained timber harvest scheduling model, <http://www.for.msu.edu/e4/e4ssafr97.html>. 1997.
- Murray, A. T.; Snyder, S. Spatial modeling in forest management and natural resource planning. **Forest Science**, v.46 (2), p. 153–156. 2000.

- 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, 1995.
- Murray, A.T.; Weintraub, A. Scale and unit specification influences in harvest scheduling with maximum area restrictions. **Forest Science**, v. 48 (4), p. 779–789. 2002.
- Nelson, J.; Brodie, J. D. Comparison of random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest plans. **Canadian Journal of Forest Research**, v.20, p. 934–942. 1990.
- Nelson, J.D.; Finn, S.T. The influence of cut-block size and adjacency rules on harvest levels and road networks. **Canadian Journal of Forest Research**, v.21, p. 595–600. 1991.
- Nelson, J.; Brodie, J. D.; Sessions, J. Integrating short-term, area-based logging plans with long-term harvest schedules. **Forest Science**, v.37 (1), p,101–122.172. 1991.
- Nur, A. M. M.; Jordan, G. A.; Baskent, E. Z. Spatial stratification. **Forestry Chronicle**, v. 76, p.311–317. 2000.
- 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.
- Öhman, K.; Eriksson, L. O. The core area concept in forming contiguous areas for long-term forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**. 28, 1032–1039. 1998.
- Öhman, K. 2001. Forest planning with consideration to spatial relationships. Doctoral diss. Department of Forest Resource Management and Geomatics, SLU. Acta Universitatis agriculturae Sueciae, Silvestria 198. 32 p.
- Pukkala, T.; Nuutinen, T.; Kangas, J. Integrating scenic and recreational amenities into numerical forest planning. **Landscape Urban Planning**, v. 32, p. 185–195. 1995.
- Pukkala, T. Introduction to multi-objective forest planning. In: Pukkala, T (ed.), **Multi-Objective Forest Planning**. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p.1-19. 2002.
- Richards, E. W.; Gunn, E. A. Tabu search design for difficult forest management optimization problems. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33, n.6, p.1126-1133. 2003.

Richards, E. W.; Gunn, E.A. Tabu search design for difficult forest management optimization problems. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33, p. 1126–1133. 2003.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Silva, G. F. Metaheurística algoritmo genetic para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.22, n.2, p.233-245, 2004.

Rodrigues, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 2001. 225f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Vicososa. 2001.

Sessions, J. Solving for habitat connections as a Steiner network problem. **Forest Science**, v. 38 (1), p. 203–207. 1992.

Snyder, S.; ReVelle, C. Dynamic selection of harvests with adjacency restrictions: the SHARe model. **Forest Science**, v.43, p. 213–222. 1997.

Weintraub, A.; Barahona, F.; Epstein, R. A column generation algorithm for solving general forest planning problems with adjacency constraints. **Forest Science**, v.40, p. 142–161. 1994.

Yoshimoto, A.; Haight, R. G.; Brodie, J. D. A comparison of the pattern search algorithm and the modified PATH algorithm for optimizing an individual tree model. **Forest Science**, v.36 (2), p. 394–412. 1990.

Williams, J. C. Delineating protected wildlife corridors with multi-objective programming. **Environ .Model. Assess**, v.3, p.77–86. 1998.

CAPÍTULO 4

REGULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FLORESTAS EQUIÂNEAS COM IN- CLUSÃO DE RESTRIÇÕES AMBIENTAIS

INTRODUÇÃO

O manejo florestal envolve a integração de práticas silviculturais e conceitos econômicos, com o propósito de garantir os objetivos do proprietário (Bettinger et al., 2009). Atualmente os planos de manejo possuem como principal desafio a contínua adaptação às mudanças ambientais e circunstâncias sociais. Isso não é trivial, visto que, o crescimento florestal é lento e, rápidas mudanças na composição das espécies ou clones, na estrutura diamétrica e em muitas outras características que influenciam na qualidade e quantidade dos serviços são usualmente impossíveis (Gadow e Pukkala, 2008).

Para a adequação dos modelos de regulação às necessidades sociais e ambientais das populações vizinhas faz-se necessário a consideração de características espaciais (Baskent e Keles, 2005), sendo que, a implementação requer a utilização de variáveis inteiras para a representação das unidades de manejo (Murray e Church, 1995).

Ao estabelecer um plano de manejo, a seleção de atividades silviculturais em cada unidade de manejo depende das características das unidades vizinhas. Por isso, as atividades silviculturais e de colheita deve ser orientada temporalmente e espaci-

almente (Bettinger et al., 2009). Essa orientação é conseguida por meio da aplicação de restrições de adjacência, *green-up* ou de conectividade.

As restrições de adjacência buscam minimizar os impactos ambientais gerados pela destruição dos habitats naturais, evitando o corte de áreas adjacentes ou de áreas contíguas extensas, provendo abrigo e alimento às populações de animais que vivem na floresta manejada, bem como mitigando os impactos visuais causados pela atividade de colheita (Castro, 2007; Moreira, 2008). Essas restrições consideram que a unidade de manejo se regenera em menos de um período do horizonte de planejamento. A imposição de restrições de *green-up* é aplicada quando a unidade de manejo não se regenera em menos de um período (Boston e Bettinger, 2001). A necessidade de movimentação de fauna entre diferentes fragmentos de floresta nativa é garantida por meio das restrições de conectividade (Moreira, 2008).

As restrições de adjacência foram propostas inicialmente por Thompson et al. (1973), onde para cada par de talhões adjacentes em cada ano do horizonte de planejamento era formulada uma restrição (Meneghin et al., 1988; Torres-Rojo e Brodie, 1990; Yoshimoto e Brodie, 1994; Murray e Church, 1996). Diversas alternativas de formulação foram propostas com o intuito de reduzir o número de restrições necessárias para representação das diversas relações de adjacência existentes (McDill e Braze, 2000).

A implementação de restrições de adjacência resulta em modelos, que contemplam a paisagem com várias unidades de manejo com características distintas e dispersas no espaço (Baskent e Jordan, 1995; Gadow e Pukkala, 2008).

Existem várias maneiras para determinar as relações espaciais entre diferentes unidades de manejo, como: a extensão das bordas comuns entre elas e a distância entre elas (Bailey e Gatrell, 1995; Chen e Gadow, 2002; Kurttilla et al., 2002). Quando as unidades de manejo apresentam diferentes conformações quanto à forma e tamanho pode-se utilizar como condição para a determinação das adjacências as distâncias entre elas (Hurme et al., 2007), ou qualquer outra característica que indique que as unidades influenciam uma nas outras.

Devido à natureza combinatória e a complexidade das relações entre as variáveis, os modelos de regulação com variáveis inteiras podem ser impossíveis de serem resolvidos por métodos clássicos de programação matemática (McDill e Braze, 2000). Como resultado muitas pesquisas tem sugerido o emprego de técnicas heurísticas para solucionar esses problemas (Nelson e Brodie, 1990; Weintraub, et al.,

1994; Murray e Church 1995; Hoganson e Borges, 1998; Borges, et. al., 1999; Boston e Bettinger, 1999).

Dentre as meta-heurísticas utilizadas para a solução de problemas com restrições de adjacência destacam-se: *simulated annealing*, busca *tabu* e algoritmos genéticos. (Murray e Church, 1995; Mullen e Butler, 1997; Brumelle et al., 1998; Boston e Bettinger, 1999; Van Deusen, 2001; Baskent and Jordan, 2002; Bettinger et al., 2002, 2003; Ohman e Eriksson, 2002; Chen e Gadow, 2002; Crowe e Nelson, 2003; Caro et al., 2003; Bettinger, et al., 2009). Alguns resultados sugerem que algoritmos genéticos são mais eficientes que as demais heurísticas de busca para a resolução de problemas com complexos objetivos espaciais.

Devido à complexidade dos modelos de regulação com restrições espaciais, foi idealizado este estudo com o objetivo de propor, avaliar e resolver um modelo matemático de regulação com o objetivo de reduzir os impactos ambientais negativos de um empreendimento florestal.

MATERIAL E MÉTODOS

Os modelos matemáticos foram formulados visando:

1. Minimizar o índice de área de colheita (IAC);
2. Maximizar o valor presente líquido global (VPL), com a aplicação de penalidades em função do IAC.

A avaliação das melhores alternativas de modelagem foi feita em função do VPL e do IAC.

Descrição dos dados

Os dados utilizados foram obtidos de uma fazenda modelo onde foi implementado o estudo de caso que representa uma situação encontrada em uma empresa florestal. A área total da fazenda modelo é de aproximadamente 9.750 ha, sendo que 35 % (3.412 ha) são de plantio efetivo e o restante da área constitui-se em reserva legal e áreas de preservação permanente. Ela foi dividida em 135 unidades de manejo em função de características administrativas, edafoclimáticas e fisiográficas. A área média de cada unidade de manejo é de 25 ha. A disposição das unidades de manejo e de classes de idade atual é apresentada na Figura 4.1 e 4.2.

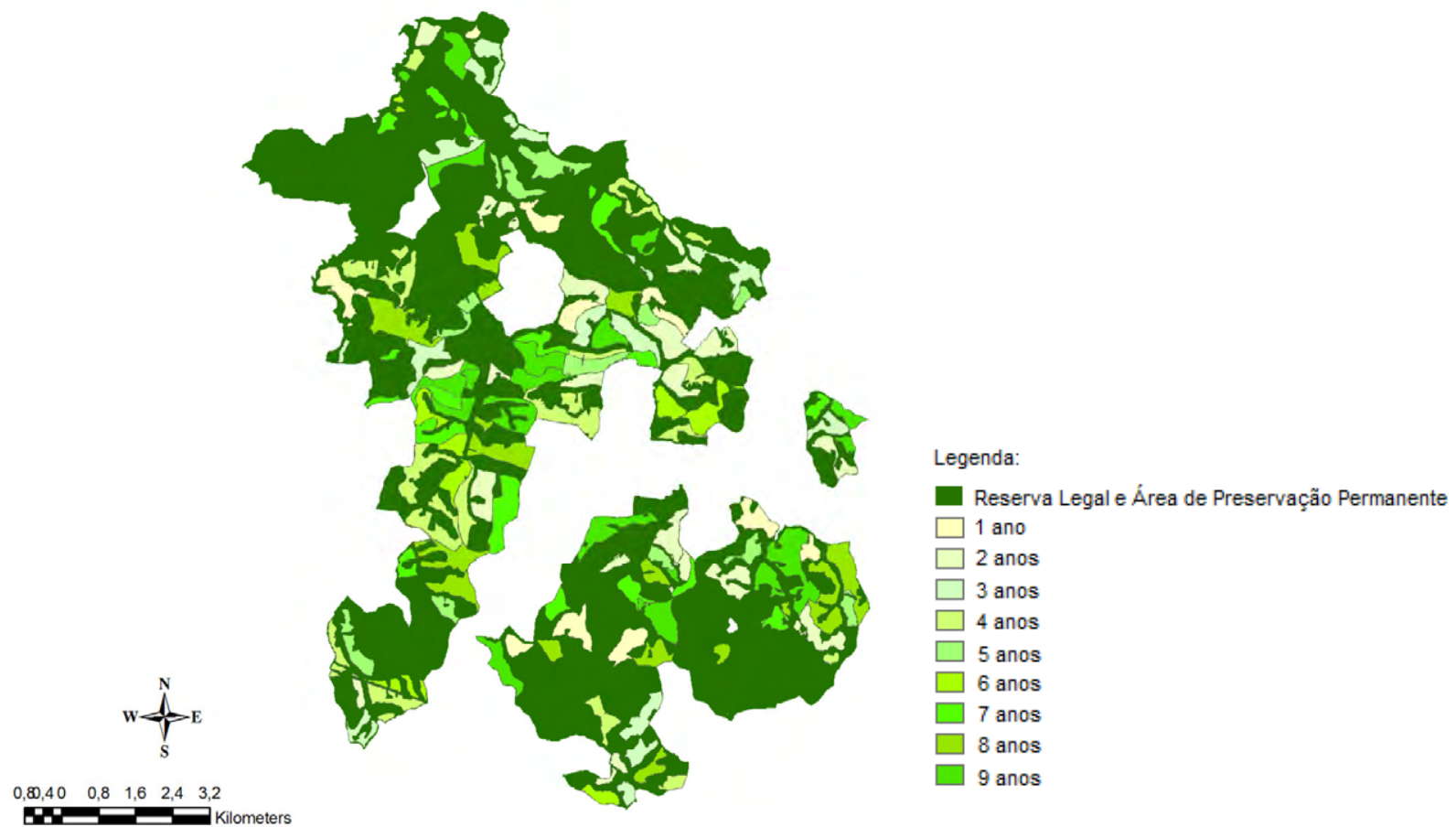


Figura 4.1: Distribuição espacial de classes de idade das áreas da fazenda modelo.

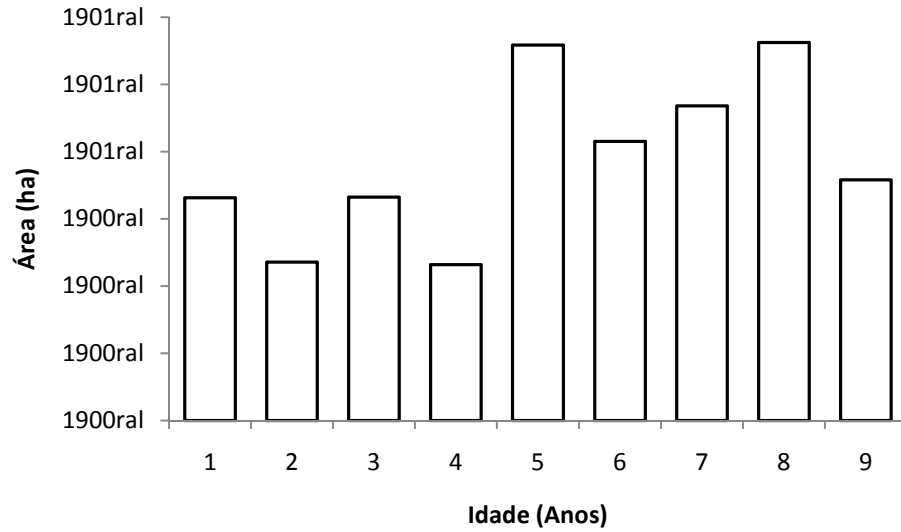


Figura 4.2: Distribuição inicial de classes de idade das áreas da fazenda modelo utilizada.

Modelos matemáticos

O modelo foi formulado empregando o sistema de planejamento florestal otimizado *SifPlan* (www.treesoftware.com.br). A abordagem utilizada para a geração de unidades de manejo foi o modelo I conforme Johnson e Scheurman (1977), com a utilização de variáveis binárias para as variáveis decisórias, resultando em:

Função Objetivo:

$$MAX Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \geq Dmin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \leq Dmax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^{IR} A_{lk} = \left(\frac{\text{Área total}}{R} \right) \quad \{k = H - 1\} \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

em que Z = valor presente líquido global (R\$); x_{ij} = variáveis de decisão, representando a j -ésima alternativa de manejo adotada na i -ésima unidade de manejo; c_{ij} =

valor presente líquido de cada unidade de manejo i , manejada segundo a alternativa de manejo j ; m = número total de unidades de manejo; n = número total de alternativas de manejo na i -ésima unidade de manejo; V_{ijk} = volume (m^3) produzido pela i -ésima unidade de manejo quando a j -ésima alternativa de manejo é adotada, para o período k ; $Dmin_k$ e $Dmax_k$ = demanda volumétrica (m^3) mínima e máxima respectivamente, em cada período do horizonte de planejamento; A_{lk} representa a área do povoamento na idade l e período k ; e R idade regulatória.

De acordo com esse modelo de programação inteira mista, a maximização de Z (1) está sujeita às restrições de singularidade (2) e (6) e às produções mínimas (3) e máximas (4), em cada período do horizonte de planejamento. A restrição (5) garante o estabelecimento da regulação florestal. Definiu-se o horizonte de planejamento como de 1,5 ciclos conforme sugerido por Leuschener (1984), sendo a rotação de 6 anos, o horizonte de planejamento foi de 18 anos. As demandas volumétricas anuais mínimas e máximas impostas foram de respectivamente 150.000 e 200.000 m^3 .

As intervenções nos povoamentos incluíram corte seguido de imediata reforma ou corte com reforma no próximo período, o que significa que apenas um regime de manejo (alto-fuste) foi avaliado. Possibilitou-se a variação da idade de corte entre 5 a 9 anos, dentro do horizonte de planejamento. Utilizou-se como rotação regulatória a idade de 6 anos. Para fins de comparação, obteve-se o mesmo modelo sem a inclusão das restrições de adjacência e restrições de classes de idade por compartimento.

O processo de otimização foi realizado pela meta-heurística algoritmo genético (AG), implementado em uma rotina computacional desenvolvido em ambiente de programação *Visual Basic for Applications* em conjunto com o Software Excel. As soluções (indivíduos) geradas para o problema em questão apresentaram o formato de um vetor $V(x) = \{X_{11}, X_{12}, \dots, X_{ij}\}$, onde a variável de decisão X_{ij} ($X_{ij} \in \{0,1\}$), simboliza a alternativa de manejo j ($j = 1, 2, \dots, n$) assinalada à unidade de manejo i ($i = 1, 2, \dots, m$) (Rodrigues et al., 2004).

A população inicial do AG foi constituída de 30 indivíduos gerados aleatoriamente, considerando a viabilidade de cada solução pela restrição de singularidade. A evolução do algoritmo genético depende de mecanismos denominados operadores genéticos, que são responsáveis pelas alterações na população gerando populações melhoradas, em cada geração. Utilizou-se o *crossover* de múltiplos pontos e uma

taxa de mutação em torno 0,6% para cada indivíduo da população. A seleção de indivíduos ocorreu por elitização. A parada da corrida do algoritmo ocorreu quando, após a estabilização do *fitness*, o AG realizou 20 novas gerações.

Avaliação da dispersão das intervenções nas unidades de manejo

Entre as diversas métricas utilizadas para avaliação do manejo da paisagem encontradas na literatura (Baskent e Jordan, 1995), optou-se por avaliar o efeito da restrição de adjacência, pela média ponderada do inverso da menor distância ao quadrado entre unidades de manejo cortadas no mesmo período, pelas áreas ao quadrado das unidades de manejo que sofrem intervenção. Quando menor o valor apresentado pelo IAC, melhor ambientalmente será o plano de manejo. O índice utilizado foi:

$$IAC = \frac{\sum_{k=0}^{H-1} \sum_{i=1}^m A_i^2 \left(\frac{1}{d_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^m A_i}$$

em que, IAC = índice de área de colheita, A_i = área da unidade de manejo i com intervenção, em hectares, d_i = distância até a unidade de manejo mais próxima com intervenção, em quilômetros.

Restrição de adjacência

Para comparação construiu-se um modelo com a aplicação clássica de restrições de adjacência. Devido à topografia muito acidentada da área de estudo, as unidades de manejo foram consideradas adjacentes quando a distância entre seus limites (bordas) era menor ou igual a 50 m. A restrição de adjacência para evitar o corte de unidades de manejo adjacentes foi:

$$n_i x_{ij} + \sum_{i \in N_i} x_{ij} \leq n_i \quad \forall i, k \quad (6)$$

em que n_i refere-se ao número de unidades de manejo adjacentes que apresentam cortes no período k (McDill e Braze, 2000).

Minimização do IAC

A minimização do IAC foi utilizada como função objetivo. A otimização foi realizada por meio da meta-heurística algoritmo genético, sendo a função de aptidão:

$$\text{Min. } Z = \frac{\sum_{k=0}^{H-1} \sum_{i=1}^m A_i^2 \left(\frac{1}{d_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^m A_i} - \alpha \left(H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij}\right)^2 - \gamma \left(A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i\right)^2$$

em que, Z = valor da função de aptidão; x_{ij} = variáveis decisórias, representando a j -ésima alternativa de manejo adotada na i -ésima unidade de manejo; c_{ij} = valor presente líquido de cada unidade de manejo i , manejada segundo a alternativa de manejo j ; m = número total de unidades de manejo; n = número total de alternativas de manejo na i -ésima unidade de manejo; V_{ijk} = volume (m^3) produzido pela i -ésima unidade de manejo quando a j -ésima alternativa de manejo é adotada, para o período k ; H_k = demanda volumétrica (m^3), em cada período do horizonte de planejamento; α e γ são os coeficiente de penalidade associados a cada restrição; A_{lkq} refere-se a áreas do compartimento q cortadas no período k ; A_l = área regulatória e A_i = área da unidade de manejo i .

Maximização do VPL com penalidades pelo IAC

A função de aptidão do algoritmo genético empregado nesse modelo baseou-se na aplicação de penalidades à função objetivo, que consiste em maximizar o valor presente líquido global. As penalidades impostas foram feitas em função de percentagens (μ) do VPL e do IAC. As percentagens variaram em razão de 5% com valor inicial de 5% e valor máximo de 100%. A função de aptidão utilizada para esse modelo foi:

$$\text{Max} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \alpha \left(H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij}\right)^2 - \mu \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}\right) \left(\frac{\sum_{k=0}^{H-1} \sum_{i=1}^m A_i^2 \left(\frac{1}{d_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^m A_i}\right) - \gamma \left(A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i\right)^2$$

Produção, receita e custo

Considerou-se somente o plantio de um clone híbrido (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) como sendo a única fonte de madeira utilizada pela empresa. A curva de produção obtida a partir de dados de parcelas de inventário florestal e utilizada neste estudo foi:

$$Volume = \frac{485,68}{1 + 7,4275 e^{-0,4062 Idade}}$$

A taxa de juros utilizada foi de 8,75% ao ano e o valor de venda da madeira foi de R\$ 80,00/m³. Valores de custo das atividades florestais foram apresentados na Tabela 4.1. O custo de colheita foi calculado em função da produtividade, através da expressão $Custo (R\$/m^3) = 37,59 \text{ Produtividade}^{-0,035}$.

Tabela 4.1: Custos empregados para a avaliação econômica dos modelos de regulação.

Ano	Atividade	Rendimento (Un/ha)	Unid.	Custo Unitário	Aplicação (%)	Total (R\$/ha)
1º ano	Adução Manual (Calcário)	20,00	hh	14,73	100%	294,58
1º ano	Adução NPK 06-10-29	13,00	hh	14,34	100%	186,47
1º ano	Adução NPK 06-30-06	10,00	hh	12,40	100%	123,95
1º ano	Ajudante Florestal	20,00	hh	11,39	100%	227,74
1º ano	Alinhamento/Marcação	10,00	hh	11,39	100%	113,87
1º ano	Capina Química Manual Total	1100	hh	14,51	80%	127,68
1º ano	Capina Química Mecânica Total	0,95	hh	88,26	20%	16,77
1º ano	Combate à Formiga Sistemático	3,50	hh	11,93	100%	41,75
1º ano	Combate à Formiga convencional	8,00	hh	11,93	10%	104,97
1º ano	Coveamento Motorizado	17,00	hh	22,99	80%	312,63
1º ano	Irrigação Caminhão Pipa	16,00	hh	18,57	100%	297,18
1º ano	Limpeza Manual	80,00	hh	11,39	30%	273,29
1º ano	Operador de Motosserra	2,00	hh	27,69	100%	55,38
1º ano	Planificação	5,00	hh	80,00	0%	-
1º ano	Plantio c/ Gel	17,00	hh	16,71	100%	284,00
1º ano	Replanteio c/ Gel	7,00	hh	16,71	100%	116,94
1º ano	Roçada Manual	30,00	hh	11,39	70%	239,13
1º ano	Subsolagem/Fosfatagem	1,50	hh	135,70	20%	40,71
1º ano	Calcário	1,50	t	59,94	100%	89,91
1º ano	Cupinicida	0,03	kg	845,13	100%	27,89
1º ano	Formicida	8,00	kg	4,27	10%	37,58
1º ano	Frete Mudanças / Insumos	100	ha	132,00	100%	132,00
1º ano	Gel	3,00	kg	6,69	100%	20,07
1º ano	Herbicida	6,00	l	9,53	100%	57,18
1º ano	Map	0,33	kg	1,35	100%	0,45
1º ano	Mudas	120	mil	23140	100%	2777,71
1º ano	NPK 06-10-29	0,40	t	949,95	100%	379,98
1º ano	NPK 06-30-06	0,12	t	939,71	100%	113,57
1º ano	Topografia	100	ha	65,67	100%	65,67
2º Ano	Adução NPK 06-10-29	13,00	hh	14,34	100%	186,47
2º Ano	Ajudante Florestal	10,00	hh	11,14	100%	111,40
2º Ano	Capina Química Manual Total	15,00	hh	14,51	100%	217,64
2º Ano	Combate à formiga convencional	6,00	hh	11,93	10%	78,73
2º Ano	Construção Manual de Aceiro	200,00	hh	11,39	10%	227,74
2º Ano	Coroamento	16,00	hh	11,39	100%	182,19
2º Ano	Roçada Manual - Pós-Plantio	16,00	hh	11,39	100%	182,19
2º Ano	Formicida	7,00	kg	4,27	10%	32,88
2º Ano	Herbicida	3,00	l	9,53	100%	28,59
2º Ano	NPK 06-10-29	0,40	t	949,95	100%	379,98
3º Ano	Capina Química Manual Total	13,00	hh	14,51	100%	188,62
3º Ano	Combate à Formiga Convencional	6,00	hh	11,93	10%	78,73
3º Ano	Manutenção Manual de Aceiro	200,00	hh	11,39	10%	227,74
3º Ano	Roçada manual	16,00	hh	11,39	100%	182,19
3º Ano	Formicida	5,00	kg	4,27	10%	23,49
3º Ano	Herbicida	6,00	kg	9,53	100%	57,18
4º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
4º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
5º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
5º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
6º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
6º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
7º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
7º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
Total						6.797,33

RESULTADOS

A formulação do modelo de regulação resultou em um problema com 8.755 variáveis decisórias. Para todos os problemas de regulação florestal obtiveram-se resultados satisfatórios para as restrições de regulação e variação volumétrica anual.

A imposição das restrições de adjacência reduziu o VPL global em torno de 8%. O valor da função objetivo para os modelos com e sem a inclusão das restrições de adjacência foi de R\$ 17.143.857,17 e R\$ 18.599.169,37, respectivamente.

A minimização do IAC resultou em um VPL de R\$ 17.322.217,40. As variações de VPL e IAC correspondentes aos modelos com a maximização do VPL com penalidades em função do IAC e da distância entre as unidades com colheita é apresentada na Figura 4.3.

O valor do IAC para o modelo com e sem a inclusão da restrição de adjacência foi de 0,246436 e 0,615032, respectivamente. A utilização dos modelos com minimização do IAC resultou em um índice de 0,176432. A influência da aplicação das penalidades no IAC é apresentada na Figura 4.4, sendo que a aplicação das penalidades acima de 20 % para o IAC resultou em modelos ambientalmente e paisagisticamente melhores (Menor IAC) e com maiores retornos econômicos (Maiores VPL).

A distribuição espacial das unidades de manejo que sofreram intervenção para a proposta de modelagem com minimização do IAC é apresentada na Figura 4.5, juntamente com o modelo clássico e com adjacência.

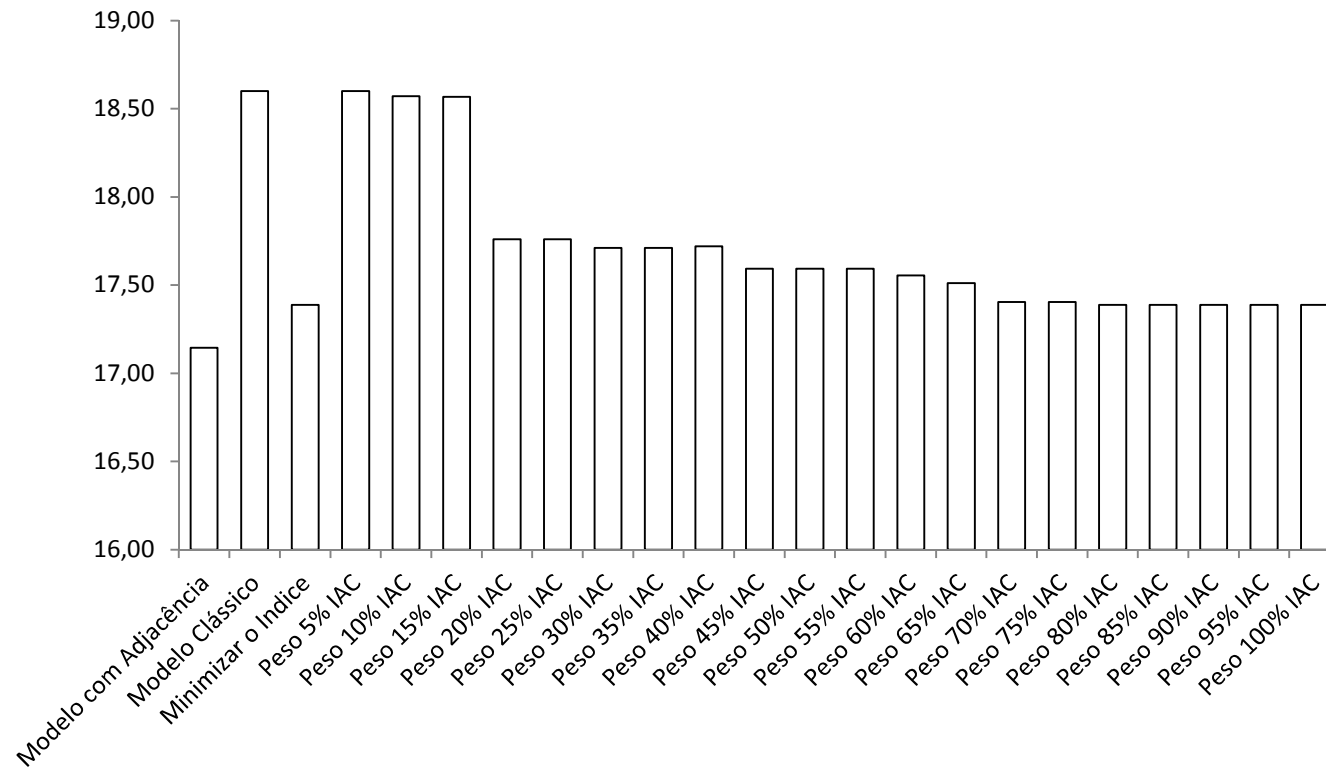


Figura 4.3: VPL em milhões de reais para cada modelo de regulação gerado nas diversas formas de modelagem (Adjacência, clássico, minimização do IAC, maximização do VPL com penalidades em função do IAC).

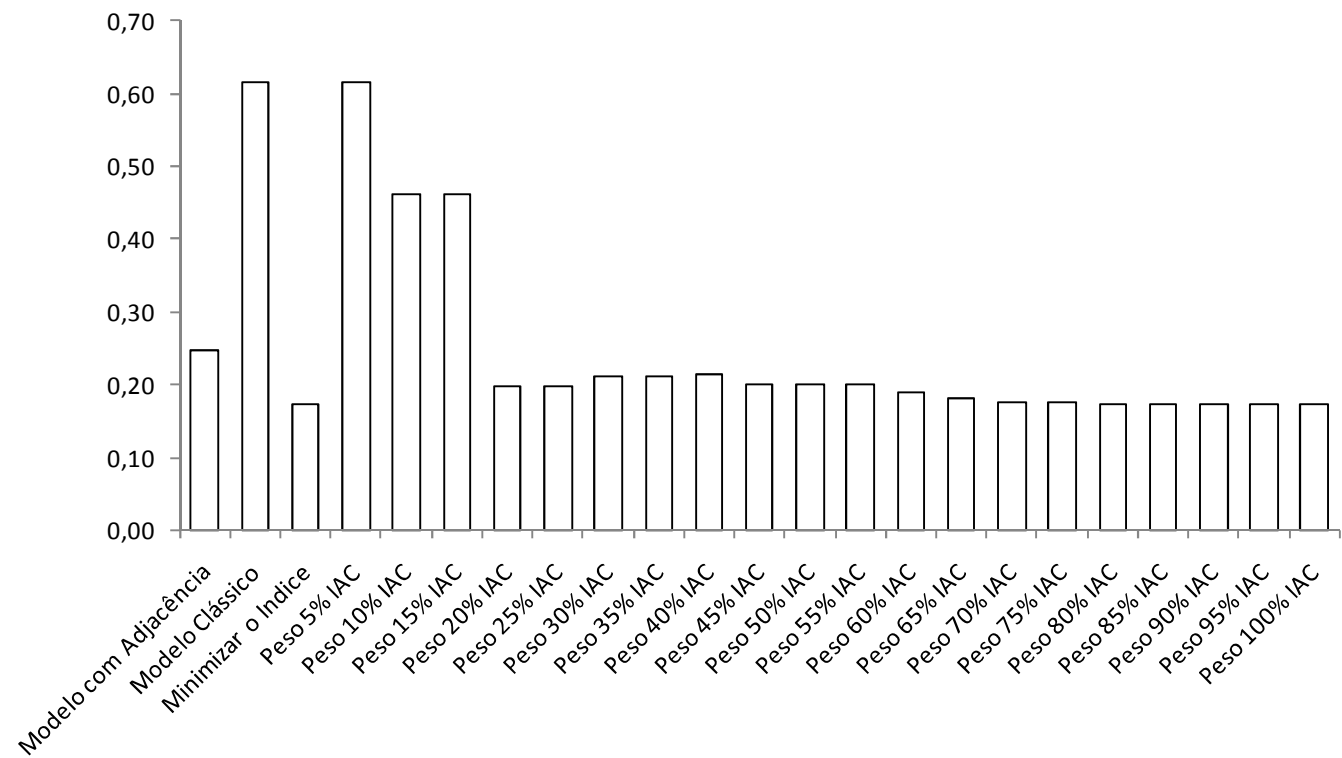




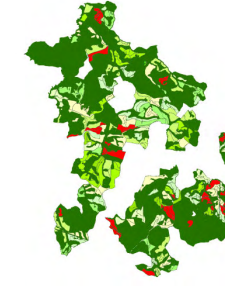
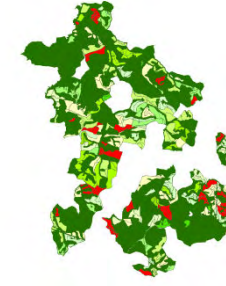
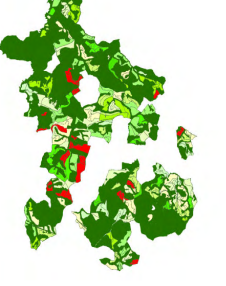


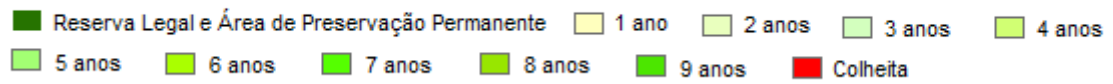
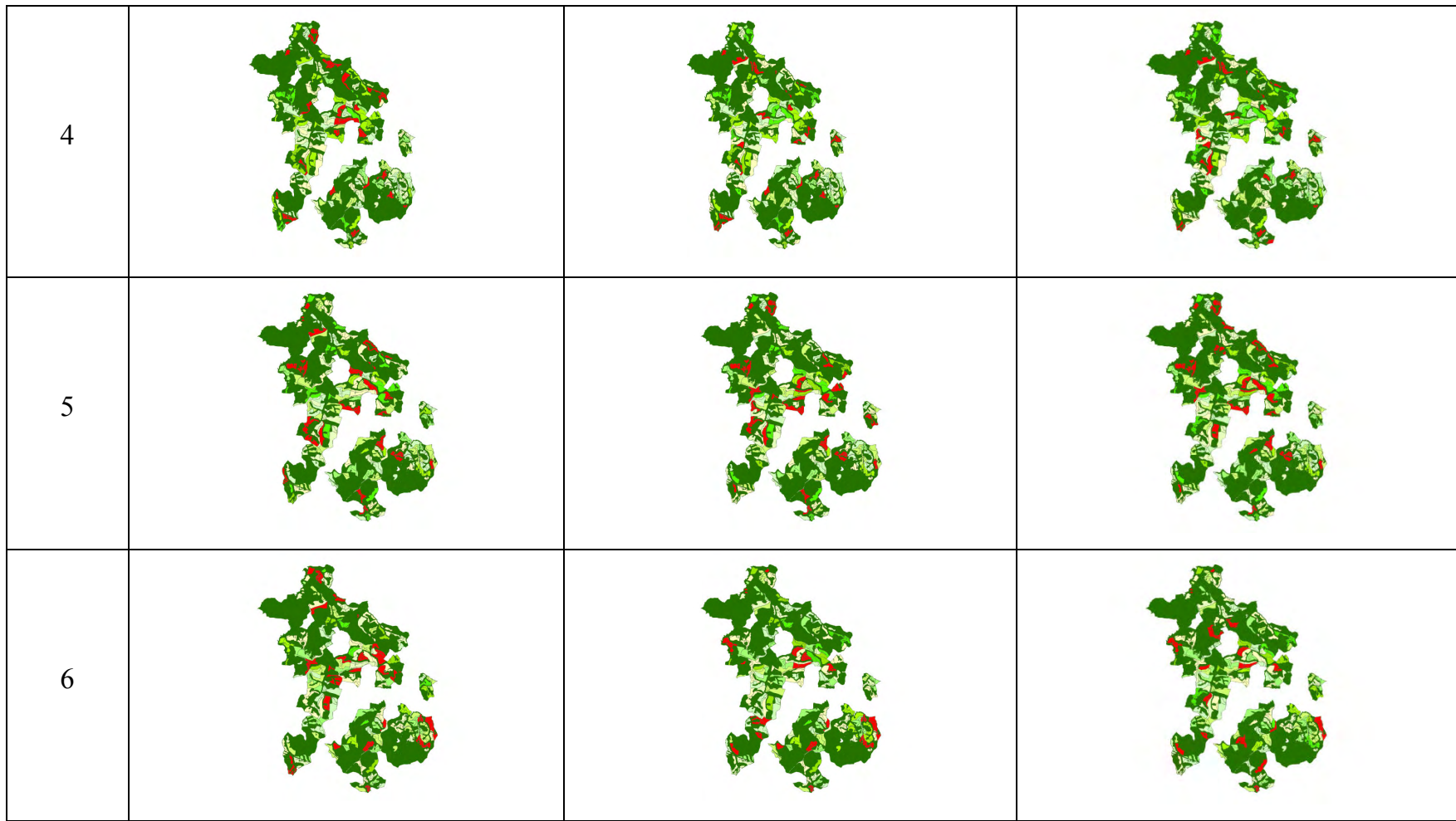


Figura 4.4: IAC para cada modelo de regulação gerado nas diversas formas de modelagem (Adjacência, clássico, minimização do IAC, maximização do VPL com penalidades em função do IAC).

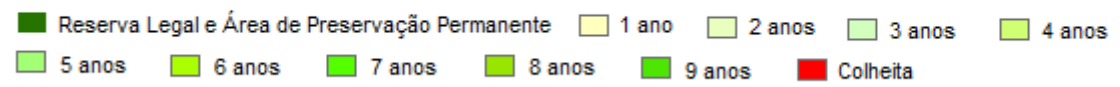
Período	Sem Restrição de Adjacência	Com restrição de Adjacência	Minimização do IAC
1			
2			
3			

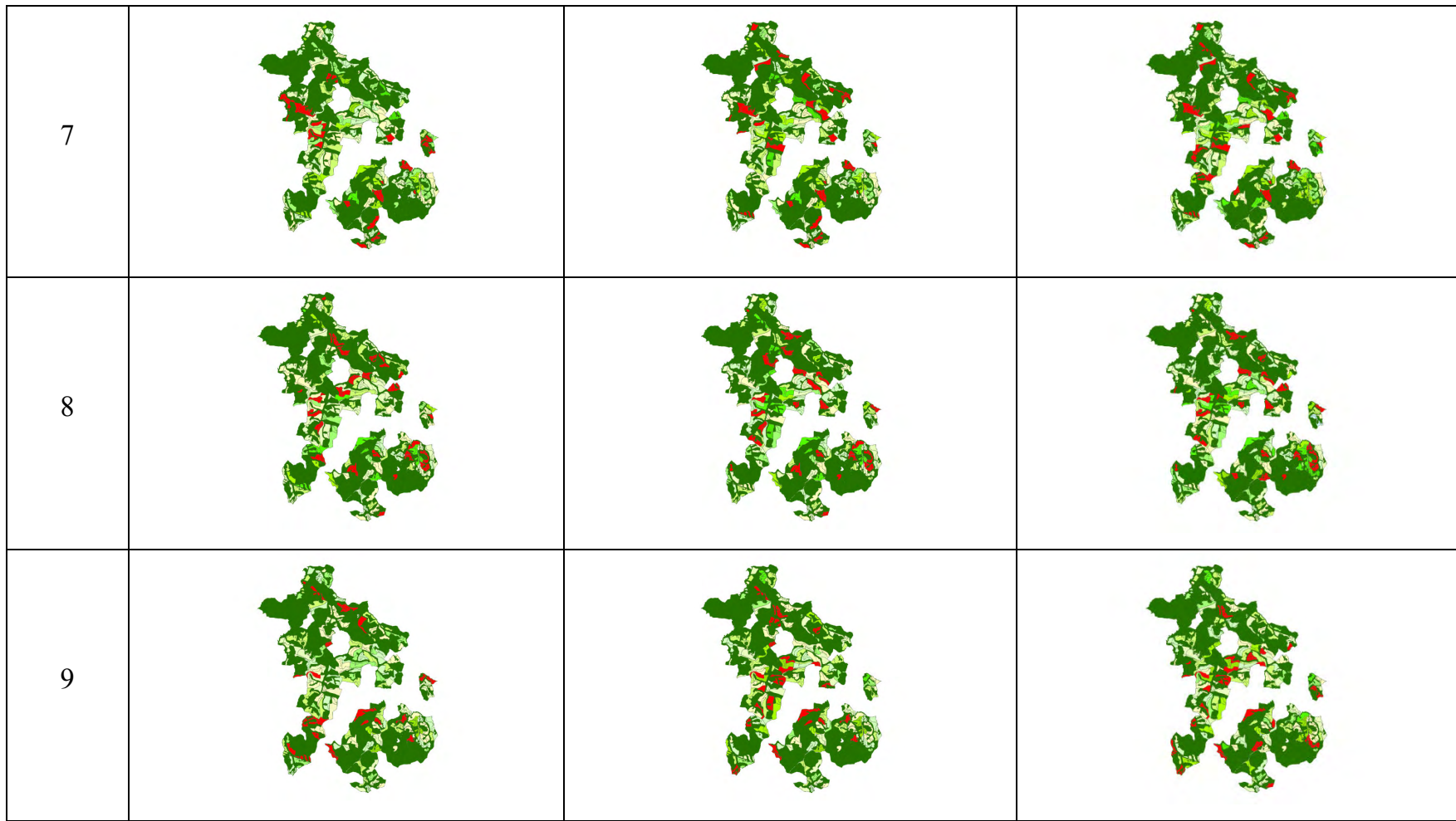
Legenda:



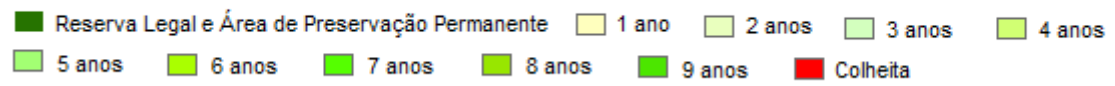


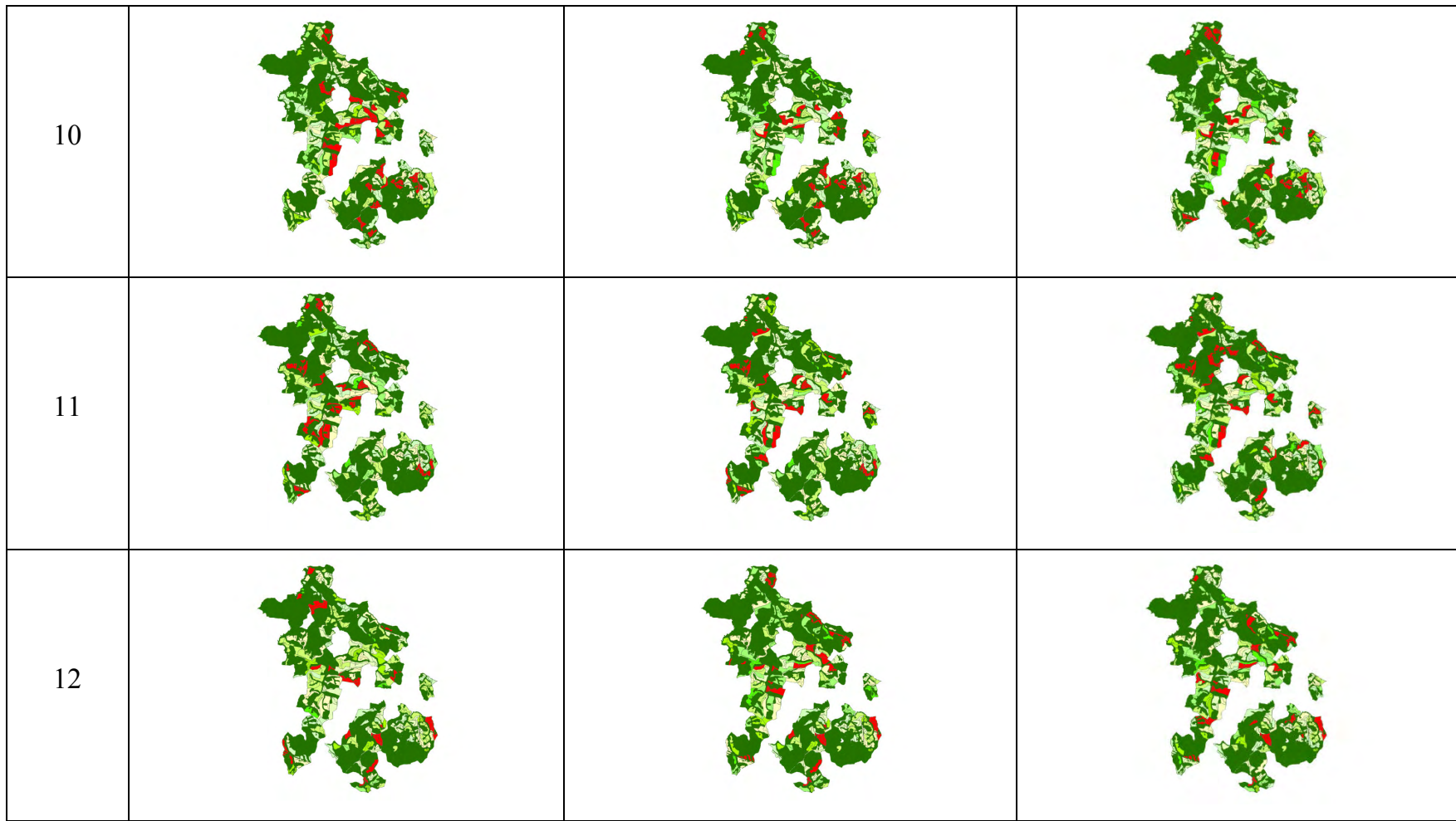
Legenda:



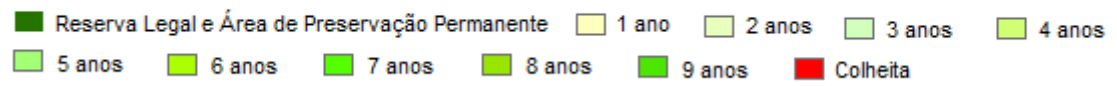


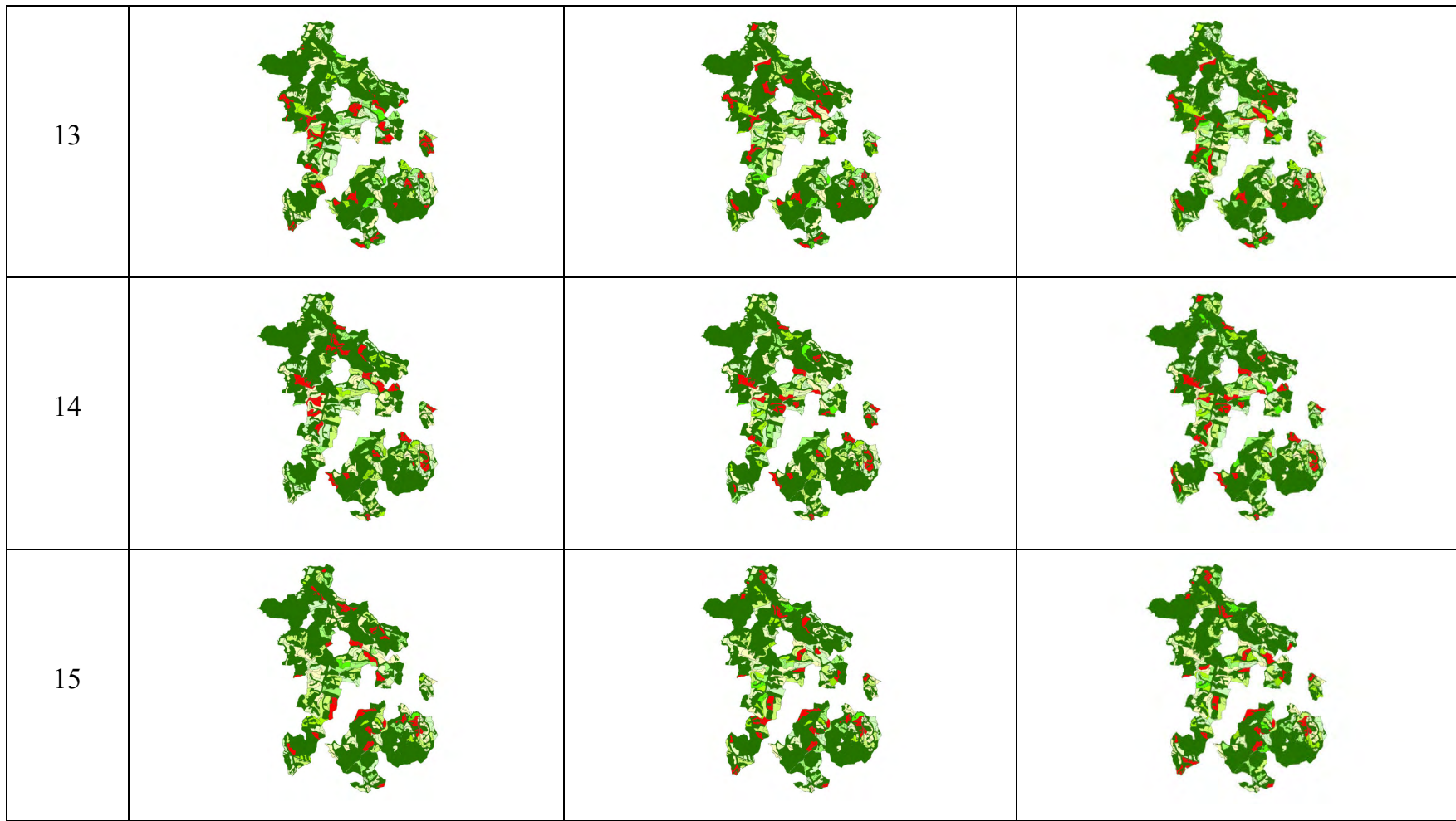
Legenda:



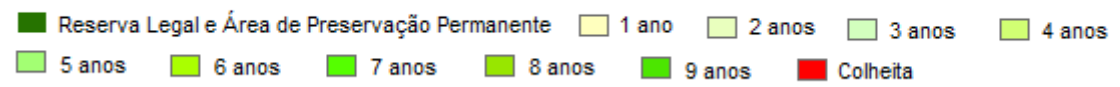


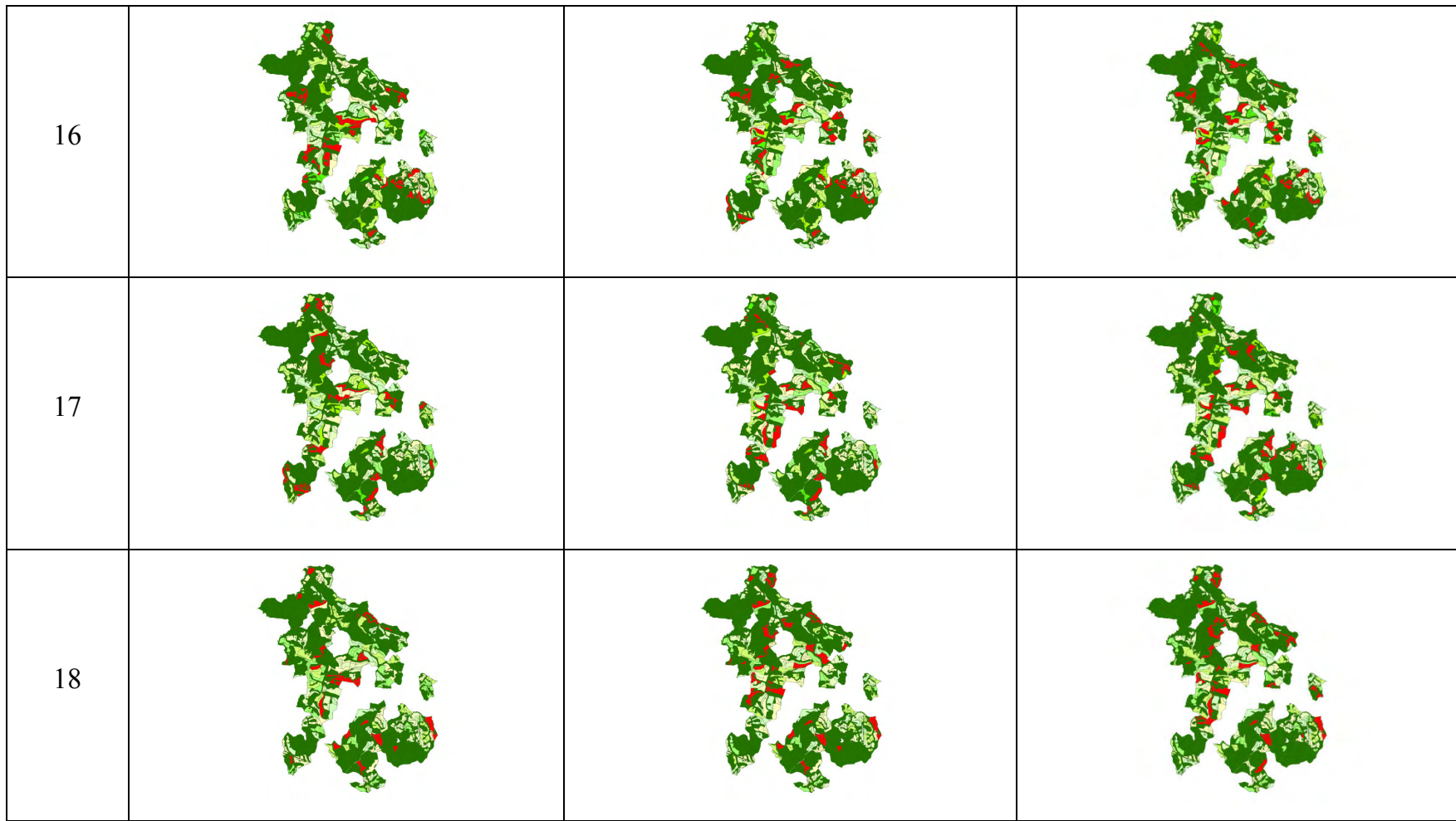
Legenda:





Legenda:





Legenda:

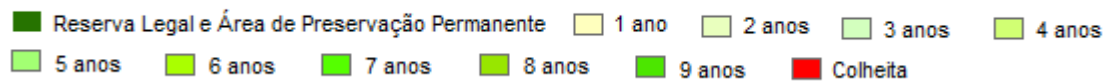


Figura 4.5: Distribuição espacial das classes de idade do modelo com adjacência, minimização do IAC e o modelo de regulação clássica.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A descrição do manejo florestal foi rapidamente estendida da produção tradicional de madeira para a produção sustentável de múltiplos serviços (Baskent e Jordan, 1995). Essas mudanças adicionaram características ainda mais complexas e de difícil solução aos modelos de regulação florestal.

A preferência por paisagens com beleza cênica são valores inerentes às pessoas, e tais valores variam de um grupo socioeconômico para outro. Portanto é importante considerar as belezas paisagísticas da floresta nos planos de manejo florestal (Bettinger, et al., 2009).

A inclusão de restrições ambientais e paisagísticas se dá principalmente pela imposição de restrições de adjacência. Tais restrições consistem no controle das interações entre unidades de manejo da floresta, onde atividades de colheita em uma determinada unidade de manejo restringem ações de corte em unidades vizinhas ou adjacentes (Murray e Church, 1995). Estas restrições impedem que grandes áreas de corte contíguas sejam formadas. A imposição dessas restrições implica em um aumento considerável de esforço computacional, exigindo muitas horas se não dias para a resolução de problemas com relativamente poucas unidades de manejo, empregando algoritmos clássicos de programação inteira (McDill e Braze, 2000). Por esse motivo, muitas pesquisas tem sido realizadas com o intuito de reduzir o tempo de processamento para a solução desses problemas.

A formulação inicial das restrições de adjacência foi feita por Thompson et al., (1973), sendo a formulação de uma restrição para cada par de talhões adjacentes. Os estudos posteriores baseados nesse tipo de formulação resultaram em reduções consideráveis de tempo de processamento (McDill e Braze, 2000). Além da enorme

dimensão que o modelo de regulação assume com a imposição desse tipo de restrição, a obtenção de uma solução viável para o problema, com o atendimento de todas as restrições, muitas vezes não é factível.

A proposta desse trabalho foi de introduzir métodos alternativos para solução de problemas de regulação com inclusão de restrições ambientais e paisagísticas. A proposta da minimização do IAC resultou em um valor de IAC 17% menor do que o modelo com restrição de adjacência e com o VPL superior em aproximadamente 2%. A minimização do IAC apresenta superioridade econômica e ambiental com relação ao modelo com restrições de adjacência. A aplicação de penalidades do IAC acima de 20%, sobre a maximização do VPL, resultou em valores de IAC melhores do que o modelo de adjacência e valores de VPL superiores, sendo estes preferidos aos modelos com restrições de adjacência. A redução do porte do modelo de regulação, a facilidade de modelagem, e o aumento do benefício ambiental favorecem a minimização do IAC como uma alternativa para modelos de regulação florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bailey, T. C.; Gatrell, A. C. **Interactive Spatial Data Analysis**. Addison-Wesley Longman, Harlow, Great Britain. 1995:

Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Characterising spatial structure of forest landscape. **Canadian Journal of Forest Research**, v.25, p.1830-1849. 1995.

Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Forest landscape management modelling using *simulated annealing*. **Forest Ecology and Management**, v. 165 p.29-45. 2002.

Baskent, E. Z.; Keles, S. Spatial Forest Planning: A review. **Ecological Modelling**, v.188, p. 145-173. 2005.

Bettinger, P.; Graetz, D.; Boston, K.; Sessions, J.; Chung, W. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. **Silva Fennica** 36: 561–584. 2002.

Bettinger, P.; Johnson, D. L.; Johnson, K. N. Spatial forest plan development with ecological and economic goals. **Ecological Modelling**, v.169 (2/3), p. 215–236. 2003.

Bettinger, P., Boston, K., Siry, L. P., Grebner, R. L. **Forest Management and Planning**. Elsevier. 331p. 2009.

Borges, J. G., Hoganson, H. M.; Rose, D. W. Combining a decomposition strategy with dynamic programming to solve spatially constrained forest management scheduling problems. **Forest Science**, v.45, p.201–212. 1999

Boston, K.; Bettinger, P. The economic impact of green-up constraints in the southeastern United States. **Forest Ecology and Management**, v.145, p. 191-202. 2001.

Brumelle, S.; Granot, D.; Halme, M.; Vertinsky, I. A tabu search algorithm for finding good forest harvest schedules satisfying green-up constraints. **European Journal of Operational Research**, v.106 (2/3), p.408–424. 1998.

Caro, F.; Constantino, M.; Martins, I.; Weintraub, A. A 2- opt tabu search procedures for the multiperiod forest harvesting problem with adjacency, green-up, old growth, and even flow constraints. **Forest Science**, v.49 (5), p. 738–751. 2003.

Castro, R. R. **Regulação de Florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

Chen, V. B. W.; Gadow, K. V. Timber harvest planning with spatial objectives, using the method of simulated annealing. **Forstwissenschaftliches Centralblatt** 121, 25–34. 2002.

Crowe, K.; Nelson, J. An indirect search algorithm for harvest scheduling under adjacency constraints. **Forest Science**, v.49 (1), p. 1–11. 2003.

Gadow, K.v., Pukkala, T. (Eds), **Designing Green Landscapes**. Springer series "Managing. Forest Ecosystems" Vol. 15. 2008.

Hoganson, H. M.; Borges, J. G. Using dynamic programming and overlapping sub-problems to address adjacency in large harvest scheduling problems. **Forest Science**, v.44, p. 526–538. 1998.

Hurme, E.; Kurttila, M.; Mönkkönen, M.; Heinonen, T.; Pukkala, T. Maintenance of Flying Squirrel Habitat and Timber Harvest: A Site specific Spatial Model in Forest Planning Calculations. **Landscape Ecology**. In press. 2007.

Johnson, K. N.; Scheurman, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives Discussion and synthesis. **Forest Science Monograph** 18. 1977.

Kurttila, M.; Pukkala, T.; Loikkanen, J. The performance of alternative spatial objective types in forest planning calculations: a case for flying squirrel and moose. **Forest Ecology and Management**, v.166, p. 245–260. 2002.

Leuschner, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley and Sons, 1984. 284p.

McDill, M. E.; Braze, J. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age-class distributions. **Forest Science**, v.46, p. 423–436. 2000.

Meneghin, B. J.; Kirby, M. W.; Jones, J. G. An algorithm for writing adjacency constraints efficiently in linear programming models. The 1988 Symposium on Systems 1988.

Moreira, J. M. M. A. P. **A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais**. 2008. 123f. Dissertação (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2008.

Mullen, D.S.; Butler, R.M. The design of a genetic algorithm based spatially constrained timber harvest scheduling model, <http://www.for.msu.edu/e4/e4ssafr97.html>. 1997.

Murray, A., Church, R. Heuristic solution approaches to operational forest planning problems. **Operation research Spektrum**, v.17, p.193-203, 1995.

Murray, A. T.; Church, R. L. Analyzing cliques for imposing adjacency restrictions in forest models. **Forest Science**, v. 42, p. 166–175. 1996.

Nelson, J.; Brodie, J. D. Comparison of random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest plans. **Canadian Journal of Forest Research**, v.20, p. 934–942. 1990.

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

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Silva, G. F. Metaheurística algoritmo genetic para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.22, n.2, p.233-245, 2004.

Thompson, E. F.; Halterman, B. G.; Lyon, T. J.; Miller, R. L. Integrating timber and wildlife management planning **The Forestry Chronicle**, v. 49, n. 6, p. 247-250, 1973.

Torres-Rojo, J. M.; Brodie, J.D. Adjacency constraints in harvest scheduling: an aggregation heuristic. **Canadian Journal of Forest Research**, n. 20, p. 978–986. 1990

Van Deusen, P. C. Scheduling spatial arrangement and harvest simultaneously. **Silva Fennica**, v. 35 (1), p.85–92. 2001.

Weintraub, A.; Barahona, F.; Epstein, R. A column generation algorithm for solving general forest planning problems with adjacency constraints. **Forest Science**, v.40, p. 142–161. 1994.

Yoshimoto, A.; Haight, R. G.; Brodie, J. D. A comparison of the pattern search algorithm and the modified PATH algorithm for optimizing an individual tree model. **Forest Science**, v.36 (2), p. 394–412. 1990.

CAPÍTULO 5

INCLUSÃO E INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS ESPACIAIS EM MODELOS DE REGULAÇÃO FLORESTAL

INTRODUÇÃO

A inclusão de aspectos espaciais nos modelos de regulação florestal é importante quando características ambientais e sociais são consideradas. No planejamento espacial a localização e as interações entre as unidades de manejo (UM) são integradas no modelo de regulação e a disposição das UM é considerada durante a otimização (Heinonen, 2007).

A realização de atividades silviculturais em uma unidade de manejo pode influenciar as unidades de manejo adjacentes, sendo que esta influencia decresce drasticamente com a distância (Strange, et al., 2002). Por exemplo, a colheita de uma unidade de manejo pode expor os talhões vizinhos a danos causados por vento, problemas de drenagem e erosão (Church et al., 1998; Baskent e Keles, 2005).

Dentre os objetivos para a inclusão de restrições espaciais nos modelos de regulação pode-se destacar a redução da abertura de extensas áreas de corte, a manutenção de corredores ecológicos entre fragmentos de floresta nativa, a redução do assoreamento de rios, a proteção da fauna e o manejo da paisagem (Baskent e Keles, 2005).

Quando características espaciais são incluídas nos modelos de regulação, as variáveis que representam as unidades de manejo deixam de ser contínuas e passam a

ser discretas e a cada unidade de manejo é, assinalada apenas uma prescrição. A programação inteira (PI) e a programação inteira mista (PIM) são utilizadas para a resolução deste tipo de problema (Hiller e Lieberman, 2006). Contudo, problemas reais podem apresentar enormes dimensões e alta complexidade (Murray e Church, 1995; Bettinger et al., 1999). Os algoritmos tradicionais de programação matemática são ineficientes na resolução desses problemas sendo necessário a utilização de técnicas heurísticas (Baskent e Jordan, 1991; Bare e Mendoza, 1992; Aarts e Lenstra, 1997; Wang e Zhang, 2001; Baskent e Jordan, 2002; Rodrigues et al., 2003; Rodrigues et al., 2004a, 2004b; Bettinger et al., 2007).

A utilização de técnicas heurísticas possibilita como principal vantagem a incorporação de características não lineares na formulação das restrições e da função objetivo do modelo de regulação. Quando as heurísticas são utilizadas para solução de modelos multi-objetivos, o componente espacial pode ser incluído na função objetivo utilizando funções de penalidade (Baskent e Jordan 2002, Öhman e Eriksson 2002).

As técnicas heurísticas mais utilizadas em modelos de regulação são *simulated annealing* (Lockwood e Moore, 1993, Baskent e Jordan, 2002, Rodrigues, 2004), *tabu search* (Bettinger et al., 1997, Richards e Gunn, 2003, Rodrigues, 2004) e algoritmos genéticos (Bettinger et al., 2002; Rodrigues, 2004; Pukkala e Kurttila, 2005). Uma significativa contribuição sobre o emprego de heurísticas, para resolução de modelos de regulação da produção de florestas equianêas, é devido aos trabalhos realizados por Rodrigues (2001, 2003, 2004a, 2004b). Esses trabalhos empregaram as heurísticas SA, BT e AG para resolução de um modelo de regulação florestal inclusões econômicas, e sustentabilidade do empreendimento.

O presente estudo objetivou-se incluir a disposição espacial das unidades de manejo com intervenções em um modelo de regulação florestal, como fator para um melhor manejo paisagístico e ambiental, bem como a aplicação da meta-heurística algoritmo genético para a resolução do modelo.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho buscou-se aplicar técnicas alternativas de formulação e inclusão de conceitos ambientais nos modelos de regulação florestal. Para isso, avaliou-se a formulação dos seguintes modelos:

1. minimização das variações das distâncias entre unidades de manejo com intervenção de colheita e o ponto de entrega da produção;
2. maximização do valor presente líquido (VPL), com a aplicação de permissão da variação da distância (de 5, 10, 15 e 20 %) entre as unidades de manejo com intervenção de colheita e o ponto de entrega da produção;
3. maximização das distâncias entre as unidades de manejo com intervenções de colheita;
4. minimização da variação das distâncias entre as unidades de manejo com intervenções de colheita;
5. maximização do valor presente líquido (VPL), com a aplicação de permissão da variação da distância (de 5, 10, 15 e 20 %) entre as unidades de manejo com intervenção de colheita.

A avaliação das melhores alternativas de modelagem foi feita em função do VPL e do índice de área de colheita (IAC). Realizou-se a modelagem tradicional, como comparativo econômico, e a aplicação de restrições de adjacência, como valor ambiental.

Descrição dos dados

Os dados utilizados foram obtidos de uma fazenda modelo onde foi implementado o estudo de caso, que representa uma situação encontrada em uma empresa florestal localizada na região centro-leste de Minas Gerais. A área total da fazenda modelo é de aproximadamente 10.000 ha, sendo que 35 % (3.491 ha) são de plantio efetivo e o restante da área constitui-se em reserva legal e áreas de preservação permanente. Ela foi dividida em 135 unidades de manejo em função de características administrativas, edafoclimáticas e fisiográficas. A área média de cada unidade de manejo é de 25 ha. A disposição das unidades de manejo e de classes de idade atual é apresentada na Figura 1 e 2.

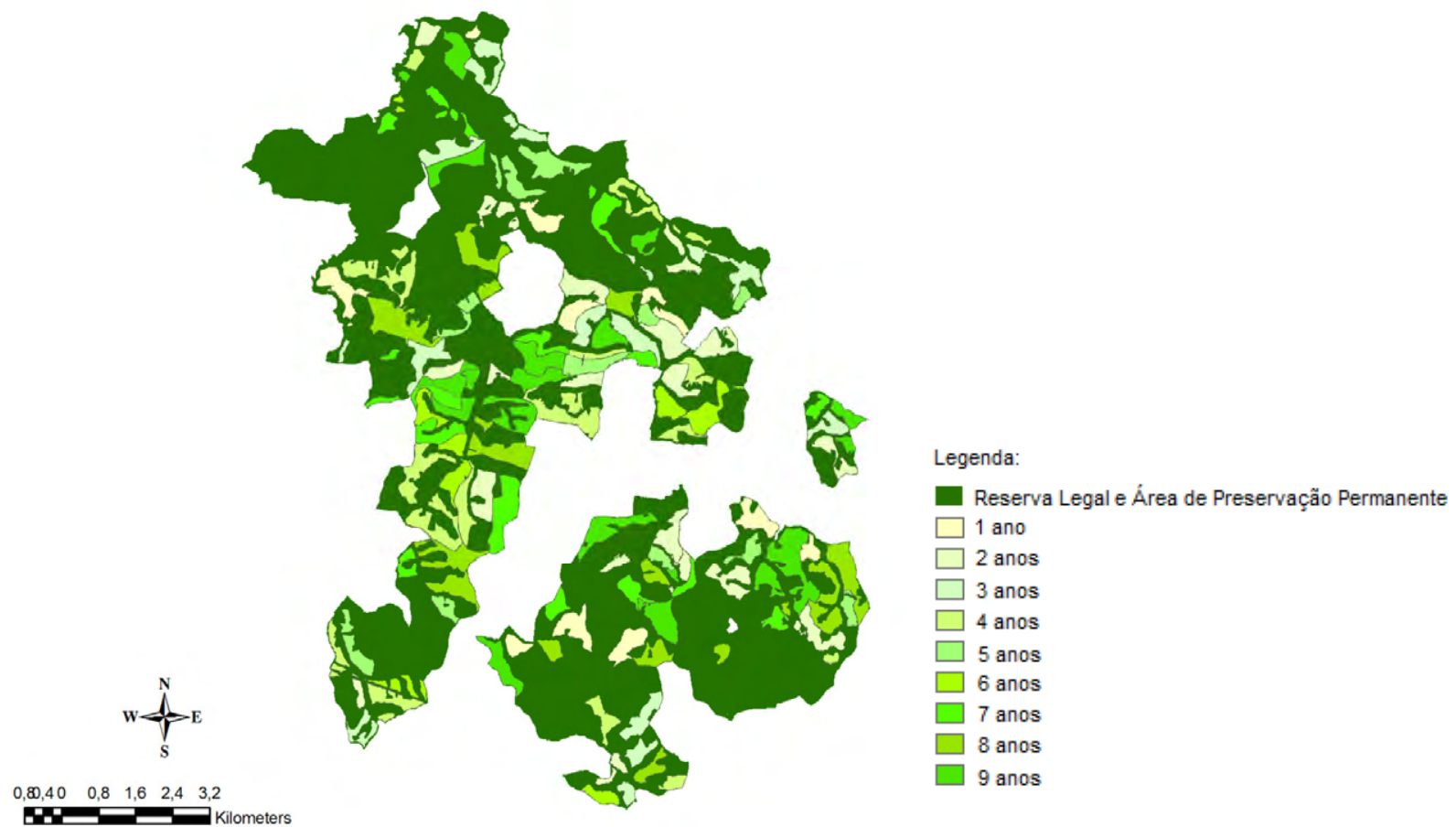


Figura 1: Distribuição espacial de classes de idade das áreas da fazenda modelo.

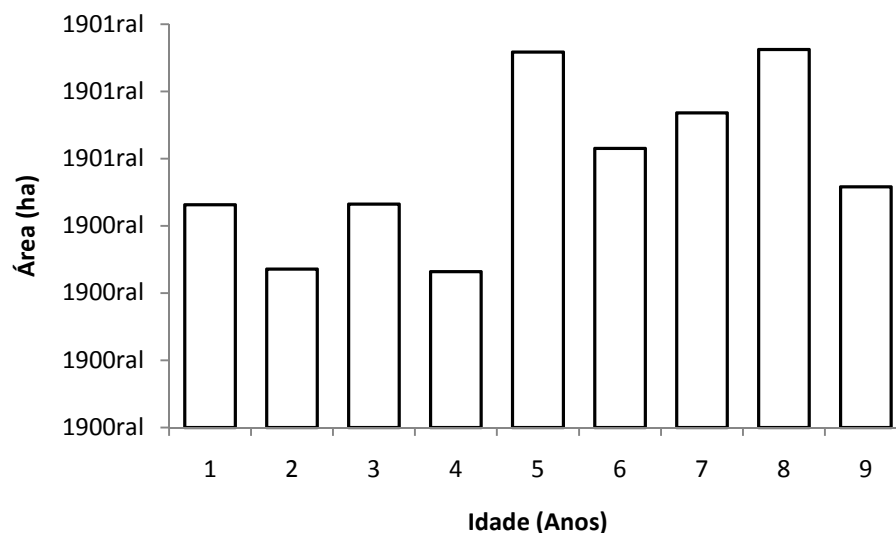


Figura 2: Distribuição inicial de classes de idade das áreas da fazenda modelo utilizada.

Produção, receita e custo

Considerou-se somente o plantio de um clone híbrido (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) como sendo a única fonte de madeira utilizada pela empresa. A curva de produção obtida a partir de dados de parcelas de inventário florestal e utilizada neste estudo foi:

$$Volume = \frac{485,68}{1 + 7,4275 e^{-0,4062 Idade}}$$

A taxa de juros utilizada foi de 8,75% ao ano e o valor de venda da madeira foi de R\$ 80,00/m³. Valores de custo das atividades florestais foram apresentados na Tabela 5.1. O custo de colheita foi calculado em função da produtividade, através da expressão $Custo (R\$/m^3) = 37,59 \text{ Produtividade}^{-0,035}$.

Tabela 5.1: Custos empregados para a avaliação econômica dos modelos de regulação.

Ano	Atividade	Rendimento (Un/ha)	Unid.	Custo Unitário	Aplicação (%)	Total (R\$/ha)
1º ano	Adubação Manual (Calcário)	20,00	hh	14,73	100%	294,58
1º ano	Adubação NPK 06-10-29	13,00	hh	14,34	100%	186,47
1º ano	Adubação NPK 06-30-06	10,00	hh	12,40	100%	123,95
1º ano	Ajudante Florestal	20,00	hh	11,39	100%	227,74
1º ano	Alinhamento/Marcação	10,00	hh	11,39	100%	113,87
1º ano	Capina Química Manual Total	1100	hh	14,51	80%	127,68
1º ano	Capina Química Mecânica Total	0,95	hh	88,26	20%	16,77
1º ano	Combate à Formiga Sistemático	3,50	hh	11,93	100%	41,75
1º ano	Combate à Formiga convencional	8,00	hh	11,93	10%	104,97
1º ano	Coveamento Motorizado	17,00	hh	22,99	80%	312,63
1º ano	Irrigação Caminhão Pipa	16,00	hh	18,57	100%	297,18
1º ano	Limpeza Manual	80,00	hh	11,39	30%	273,29
1º ano	Operador de Motosserra	2,00	hh	27,69	100%	55,38
1º ano	Planificação	5,00	hh	80,00	0%	-
1º ano	Plantio c/ Gel	17,00	hh	16,71	100%	284,00
1º ano	Replântio c/ Gel	7,00	hh	16,71	100%	116,94
1º ano	Roçada Manual	30,00	hh	11,39	70%	239,13
1º ano	Subsolagem/Fosfatagem	1,50	hh	135,70	20%	40,71
1º ano	Calcário	1,50	t	59,94	100%	89,91
1º ano	Cupinicida	0,03	kg	845,13	100%	27,89
1º ano	Formicida	8,00	kg	4,27	10%	37,58
1º ano	Frete Mudanças / Insumos	100	ha	132,00	100%	132,00
1º ano	Gel	3,00	kg	6,69	100%	20,07
1º ano	Herbicida	6,00	l	9,53	100%	57,18
1º ano	Map	0,33	kg	1,35	100%	0,45
1º ano	Mudas	120	mil	23140	100%	2777,71
1º ano	NPK 06-10-29	0,40	t	949,95	100%	379,98
1º ano	NPK 06-30-06	0,12	t	939,71	100%	113,57
1º ano	Topografia	100	ha	65,67	100%	65,67
2º Ano	Adubação NPK 06-10-29	13,00	hh	14,34	100%	186,47
2º Ano	Ajudante Florestal	10,00	hh	11,14	100%	111,40
2º Ano	Capina Química Manual Total	15,00	hh	14,51	100%	217,64
2º Ano	Combate à formiga convencional	6,00	hh	11,93	10%	78,73
2º Ano	Construção Manual de Aceiro	200,00	hh	11,39	10%	227,74
2º Ano	Coroamento	16,00	hh	11,39	100%	182,19
2º Ano	Roçada Manual - Pós-Plantio	16,00	hh	11,39	100%	182,19
2º Ano	Formicida	7,00	kg	4,27	10%	32,88
2º Ano	Herbicida	3,00	l	9,53	100%	28,59
2º Ano	NPK 06-10-29	0,40	t	949,95	100%	379,98
3º Ano	Capina Química Manual Total	13,00	hh	14,51	100%	188,62
3º Ano	Combate à Formiga Convencional	6,00	hh	11,93	10%	78,73
3º Ano	Manutenção Manual de Aceiro	200,00	hh	11,39	10%	227,74
3º Ano	Roçada manual	16,00	hh	11,39	100%	182,19
3º Ano	Formicida	5,00	kg	4,27	10%	23,49
3º Ano	Herbicida	6,00	kg	9,53	100%	57,18
4º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
4º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
5º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
5º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
6º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
6º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
7º Ano	Capina Química Manual Total	6,00	hh	11,93	10%	78,73
7º Ano	Formicida	2,00	kg	4,27	10%	9,39
Total						6.797,33

O modelo foi formulado empregando o sistema de planejamento florestal otimizado *SifPlan* (www.treesoftware.com.br). A abordagem utilizada para a geração de unidades de manejo foi o modelo I proposto por Curtis (1962), com a utilização de variáveis binárias para as variáveis decisórias, resultando em:

Função Objetivo:

$$MAX Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \geq Dmin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \leq Dmax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\} \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^{IR} A_{lk} = \left(\frac{Área\ total}{IR} \right) \quad \{k = H - 1\} \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

em que Z = valor presente líquido global (R\$); x_{ij} = variáveis de decisão, representando a j -ésima alternativa de manejo adotada na i -ésima unidade de manejo; c_{ij} = valor presente líquido de cada unidade de manejo i , manejada segundo a alternativa de manejo j ; m = número total de unidades de manejo; n = número total de alternativas de manejo na i -ésima unidade de manejo; V_{ijk} = volume (m^3) produzido pela i -ésima unidade de manejo quando a j -ésima alternativa de manejo é adotada, para o período k ; $Dmin_k$ e $Dmax_k$ = demanda volumétrica (m^3) mínima e máxima respectivamente, em cada período do horizonte de planejamento; A_{lk} representa a área do povoamento na idade l e período k ; e IR rotação regulatória.

De acordo com esse modelo de programação inteira mista, a maximização do valor presente global (1) está sujeita às restrições de singularidade (2) e (6) e às produções mínimas (3) e máximas (4), em cada período do horizonte de planejamento. A restrição (5) garante o estabelecimento da regulação florestal. Definiu-se o horizonte de planejamento como de 1,5 ciclos, conforme sugerido por Leuschener (1984); sendo a rotação de 6 anos, o horizonte de planejamento foi de 18 anos. As demandas volumétricas anuais mínimas e máximas impostas foram de, respectivamente 150.000 e 200.000 m^3 .

As intervenções nos povoamentos incluíram corte seguido de imediata reforma ou corte com reforma no próximo período, o que significa que apenas um regime

de manejo (alto-fuste) foi avaliado. Possibilitou-se a variação da idade de corte entre 5 a 9 anos, dentro do horizonte de planejamento, sendo considerada uma rotação regulatória de 6 anos. Para fins de comparação, obteve-se o mesmo modelo sem a inclusão das restrições de adjacência e restrições de classes de idade por compartimento.

O processo de otimização foi realizado pela meta-heurística algoritmo genético (AG). O AG foi implementado em uma rotina computacional utilizando o ambiente de programação *Visual Basic for Applications* em conjunto com o Software Microsoft Excel. As soluções (indivíduos) geradas para o problema apresentaram o formato de um vetor $V(x) = \{X_{11}, X_{12}, \dots, X_{ij}\}$, onde a variável de decisão X_{ij} ($X_{ij} \in \{0,1\}$), simboliza a alternativa de manejo j ($j = 1, 2, \dots, n$) assinalada à unidade de manejo i ($i = 1, 2, \dots, m$) (Rodrigues et al., 2004).

A população inicial do AG foi constituída de 30 indivíduos gerados aleatoriamente, considerando a viabilidade de cada solução pela restrição de singularidade. Utilizou-se o *crossover* de múltiplos pontos e uma taxa de mutação em torno 0,6% para cada indivíduo da população. A seleção de indivíduos ocorreu por elitização. A seleção dos indivíduos foi feita pelo método da *roleta russa*. A parada da corrida do algoritmo ocorreu quando, após a estabilização do *fitness*, o AG realizou 20 novas gerações.

Maximização do VPL

A função de aptidão do algoritmo genético empregada nesse trabalho baseia-se na aplicação de penalidades à função objetivo, que consiste em maximizar o valor presente líquido global. As penalidades impostas referem-se à variação volumétrica acima ou abaixo da demanda proposta, áreas com cortes adjacentes e distribuição irregular de classes de idades ao final do horizonte de planejamento. A função de *fitness* é apresentada a seguir:

$$Max. = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \alpha \left(H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij} \right)^2 - \gamma \left(A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i \right)^2$$

em que, H_k = demanda volumétrica (m^3), no k -ésimo período do horizonte de planejamento; α e γ são os coeficientes de penalidade associados a cada restrição; y_{ij} refe-

re-se ao número de unidades adjacentes cortadas em um mesmo período; A_l = área regulatória e A_i = área da unidade de manejo i .

Minimização das variações da distância entre intervenções e o posto de entrega de madeira

Neste modelo, buscou-se a minimização das variações de distância entre as intervenções de colheita e a unidade de recepção da produção. A formulação geração da função de aptidão para o AG foi:

$$Min. = (\bar{D} - \sum_{i=1}^n D_i)^2 - \alpha (H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij})^2 - \gamma (A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i)^2$$

em que, D_i é a distancia entre a unidade de manejo em situação de colheita e a unidade de recepção de madeira, \bar{D} é a distância média.

Maximização do VPL com penalidades pela distância entre intervenções e o posto de entrega de madeira

A função de aptidão do algoritmo genético empregado nesse modelo também se baseia na aplicação de penalidades à função objetivo, que consiste em maximizar o valor presente líquido global. As penalidades impostas foram feitas em função de percentagens (μ) do VPL e da distância entre as unidades de corte e a unidade receptora da produção. As percentagens variaram em razão de 5% com valor inicial de 5% e valor máximo de 20%. A função de aptidão utilizada para esse modelo foi:

$$Max. = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \alpha (H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij})^2 - \mu (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}) (\bar{D} - \sum_{i=1}^n D_i)^2 - \gamma (A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i)^2$$

Maximização das distâncias entre as intervenções

Como alternativa para aplicação de restrições ambientais e paisagísticas optou-se pela maximização das distâncias entre as unidades de manejo que estão sofrendo intervenções de colheita. A função de aptidão utilizada foi:

$$Max. = \sum_{i=1}^n d_i - \alpha (H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij})^2 - \gamma (A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i)^2$$

em que, d_i representa a distância entre a unidade que está sofrendo intervenção e a outra unidade de corte mais próxima.

Minimização das variações das distâncias entre as intervenções

Como alternativa para aplicação de restrições ambientais e paisagísticas optou-se pela minimização das variações entre as unidades de manejo com intervenções, ou seja, a manutenção constante das distâncias. A função de aptidão utilizada foi:

$$Min. = (\bar{d} - \sum_{i=1}^n d_i)^2 - \alpha (H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij})^2 - \gamma (A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i)^2$$

em que, d_i representa a distância entre a unidade que está sofrendo intervenção e a outra unidade de corte mais próxima, \bar{d} é a distância média.

Maximização do VPL com penalidades pela distância entre unidades de manejo

A função de aptidão do algoritmo genético empregado nesse modelo também se baseia na aplicação de penalidades à função objetivo, que consiste em maximizar o valor presente líquido global. As penalidades impostas foram feitas em função de percentagens (μ) do VPL e da distância entre as unidades de manejo em colheita e a próxima unidade na mesma situação. As percentagens variaram em razão de 5% com valor inicial de 5% e valor máximo de 20%. A função de aptidão utilizada para esse modelo foi:

$$Max = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \alpha (H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij})^2 - \mu (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}) (\bar{d} - \sum_{i=1}^n d_i)^2 - \gamma (A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i)^2$$

Restrição de adjacência

Para comparação construiu-se um modelo com a aplicação clássica de restrições de adjacência. Devido à topografia muito acidentada da área de estudo, as unidades de manejo foram consideradas adjacentes quando a distância entre seus

limites (bordas) era menor ou igual a 50 m. A restrição de adjacência para evitar o corte de unidades de manejo adjacentes foi:

$$n_i x_{ij} + \sum_{i \in N_i} x_{ij} \leq n_i \quad \forall i, k \quad (6)$$

em que n_i refere-se ao número de unidades de manejo adjacentes que apresentam cortes no período k (McDill e Braze, 2000).

As penalidades impostas referem-se à variação volumétrica acima ou abaixo da demanda proposta, áreas com cortes adjacentes e distribuição irregular de classes de idades ao final do horizonte de planejamento. A função de *fitness* é apresentada a seguir:

$$Max. = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \alpha (H_k - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_{ij} x_{ij})^2 - \beta (\sum_{k=0}^{k=h-1} y_i)^2 - \gamma (A_l - \sum_{i=1}^m A_i x_i)^2$$

em que, H_k = demanda volumétrica (m^3), no k -ésimo período do horizonte de planejamento; α , β e γ são os coeficientes de penalidade associados a cada restrição; y_{ij} refere-se ao número de unidades adjacentes cortadas em um mesmo período; A_l = área regulatória e A_i = área da unidade de manejo i .

Avaliação da Dispersão das Intervenções nas Unidades de Manejo

Entre as diversas métricas utilizadas para avaliação do manejo da paisagem encontradas na literatura (Baskent e Jordan, 1995), optou-se por avaliar o efeito da restrição de adjacência, pela média ponderada do inverso da menor distância ao quadrado entre unidades de manejo cortadas no mesmo período, pelas áreas ao quadrado das unidades de manejo que sofrem intervenção. Quando menor o valor apresentado pelo IAC, melhor ambientalmente será o plano de manejo. O índice utilizado foi:

$$IAC = \frac{\sum_{k=0}^{H-1} \sum_{i=1}^m A_i^2 \left(\frac{1}{d_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^m A_i}$$

em que, IAC = índice de área de colheita, A_i = área da unidade de manejo i com intervenção, em m^2 , d_i = distância até a unidade de manejo mais próxima com intervenção, em metros.

RESULTADOS

A formulação do modelo de planejamento resultou em um modelo com 8.755 variáveis decisórias. As formulações das restrições de adjacência resultaram em 37.555 restrições. Todos os modelos testados supriram a demanda volumétrica imposta. A imposição das restrições de adjacência reduziu o VPL global em torno de 8%. O valor da função objetivo para os modelos com e sem a inclusão das restrições de adjacência foi de R\$ 17.143.857,17 e R\$ 18.599.169,37, respectivamente.

O valor do IAC para o modelo com e sem a inclusão da restrição de adjacência foi de 0,246436 e 0,615032, respectivamente. O modelo com a manutenção das distâncias entre as unidades de manejo com intervenções de colheita e a unidade de entrega da produção apresentou uma redução de menos de 1% em relação ao modelo com restrições de adjacência, sendo que o valor do IAC para esse modelo foi de 0,243089. A variação do VPL e do IAC referentes aos demais modelos que consideram a distância entre as unidades de manejo com corte e a unidade de entrega da produção é apresentada na Figura 5.3 e 5.4.

Os modelos com a relação às distâncias entre as unidades de manejo que sofreram intervenções não apresentaram soluções, contudo as restrições volumétricas e regulatórias foram satisfeitas. O modelo com a maximização das distâncias entre as unidades de manejo que sofreram intervenções apresentou um aumento de 1% com relação ao valor do modelo com adjacência, entretanto o valor para o IAC foi de 0,326927. O modelo que objetivou a redução da variação da distância entre as unidades de manejo que sofreram intervenções, apresentou uma melhoria no valor do IAC com relação ao modelo com adjacência e uma pequena variação com relação ao

VPL. A comparação dos resultados de VPL e IAC, entre os modelos que consideram as variações entre as distâncias entre as unidades de manejo é apresentada na Figura 5.5 e 5.6.

A distribuição espacial das intervenções e das idades dos modelos com adjacência, modelo clássico, minimização das distâncias entre unidades de manejo em colheita e os postos de entrega da produção, e a minimização da variação entre unidades em colheita é apresentada na Figura 5.7.

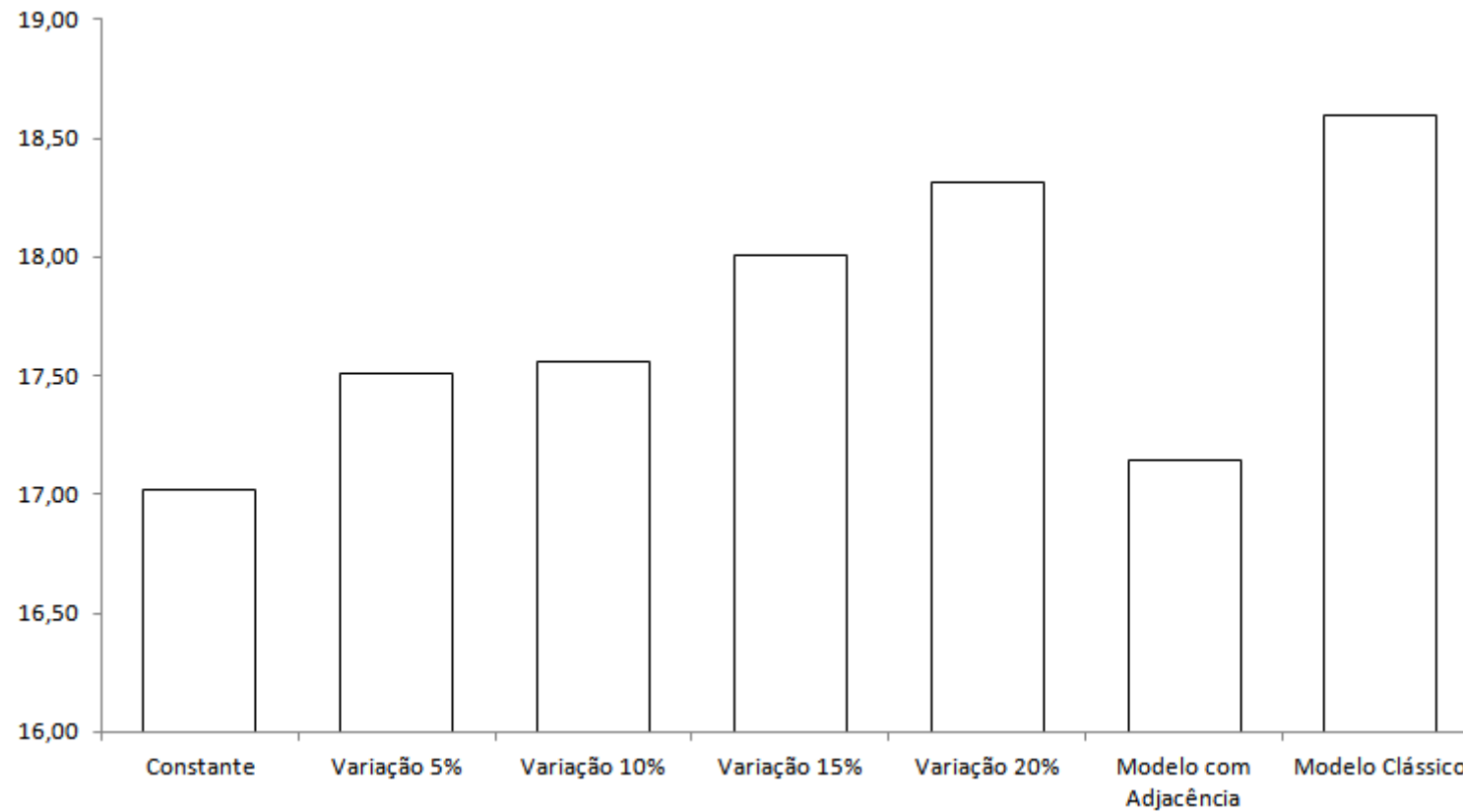


Figura 5.3: Valores de VPL, em milhões de reais, referentes às distâncias entre as unidades de manejo com corte e a unidade de entrega da produção.

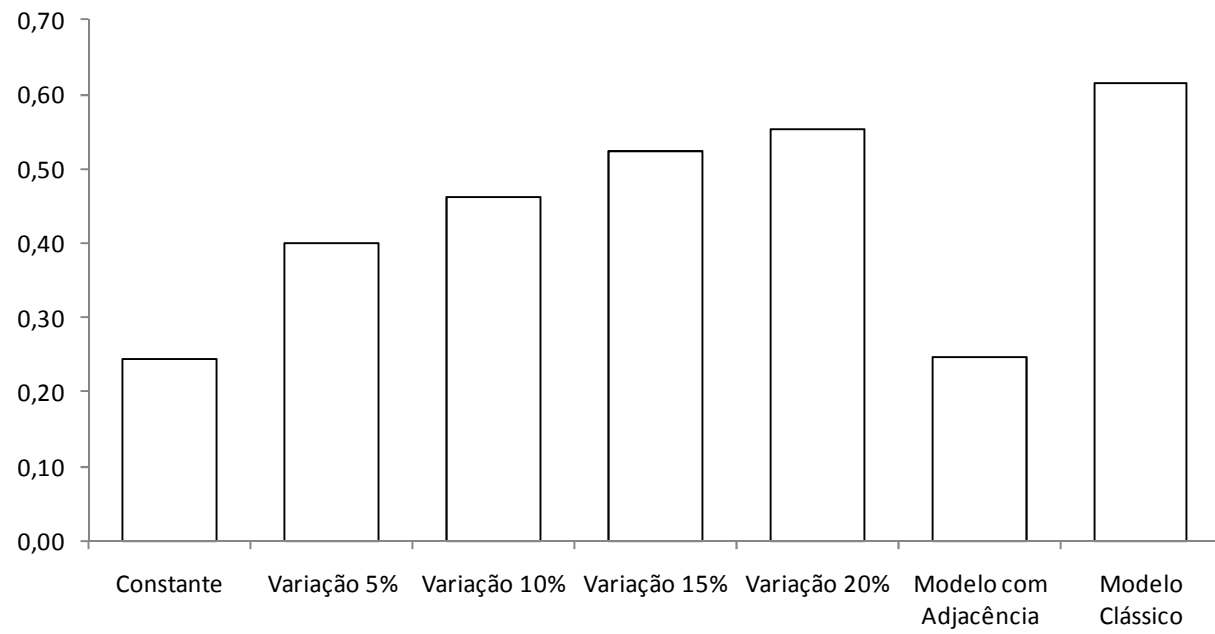


Figura 5.4: Valores de IAC referentes às distâncias entre as unidades de manejo com corte e a unidade de entrega da produção.

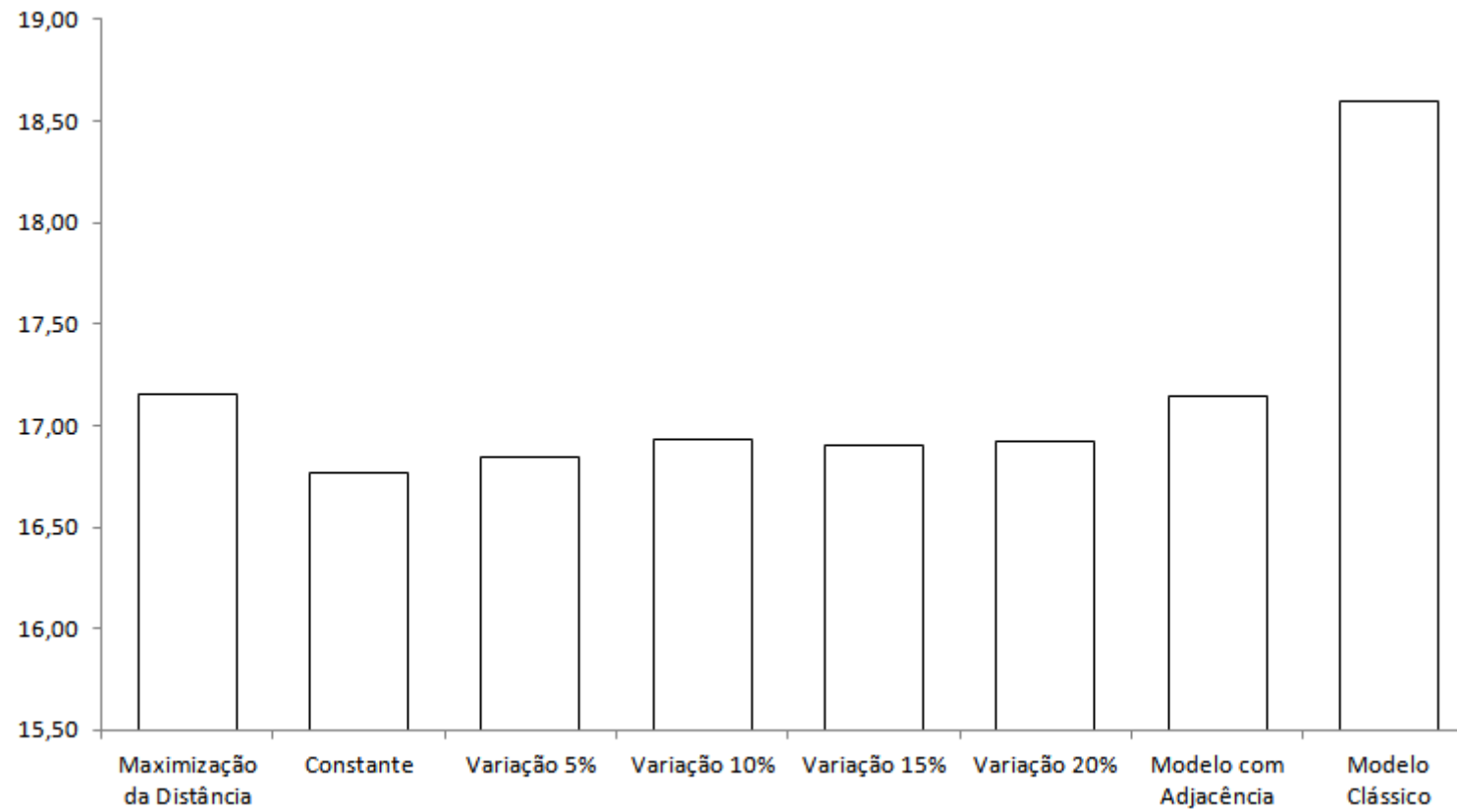


Figura 5.5: Valores de VPL, em milhões de reais, referentes às distâncias entre as unidades de manejo com corte.

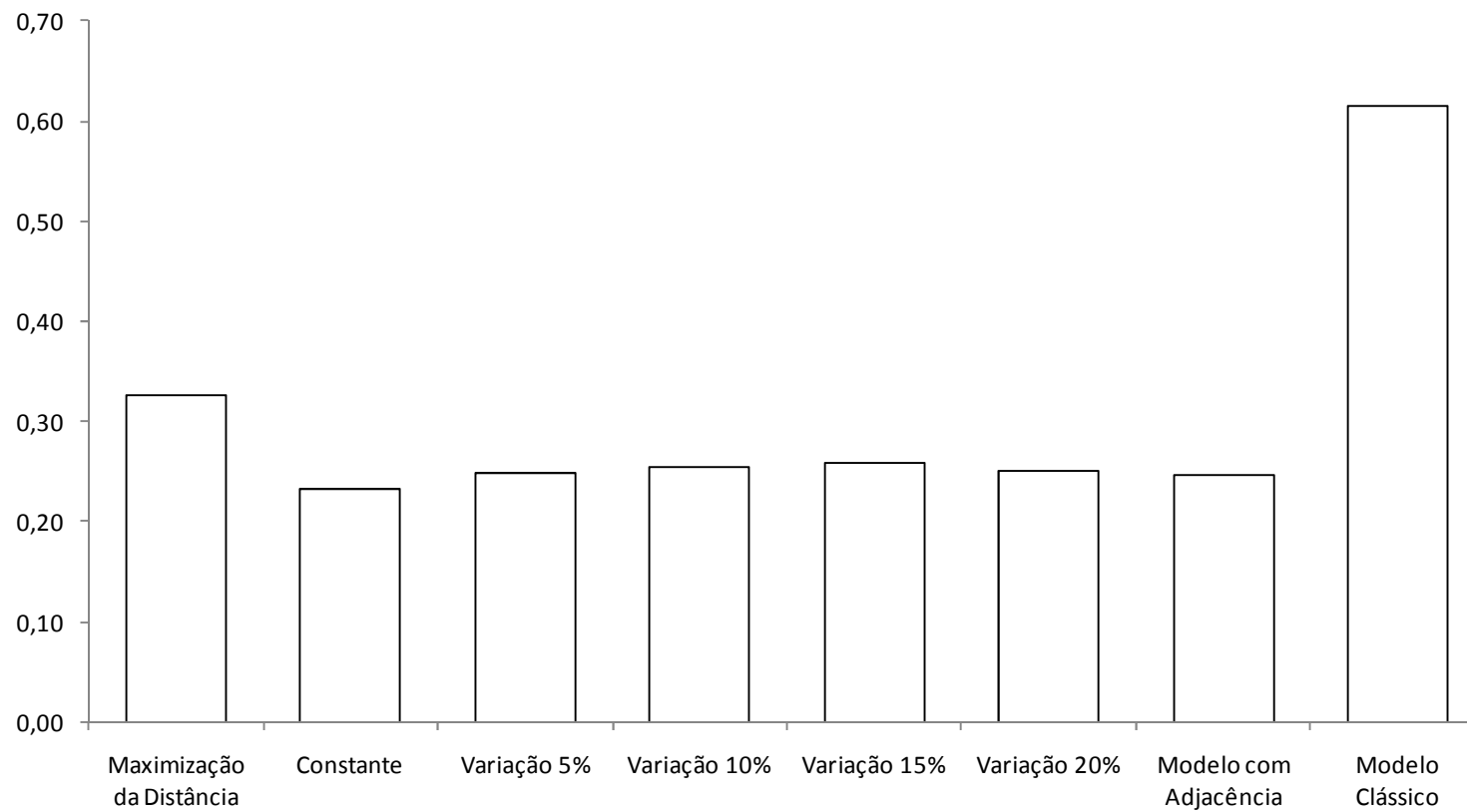






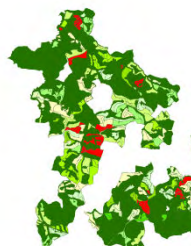
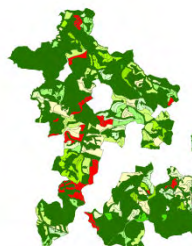

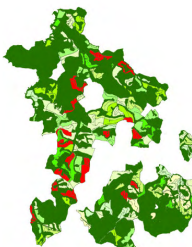
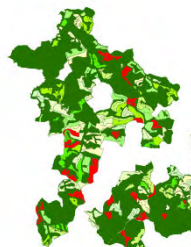
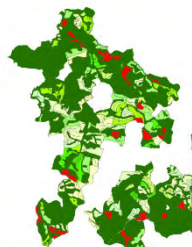
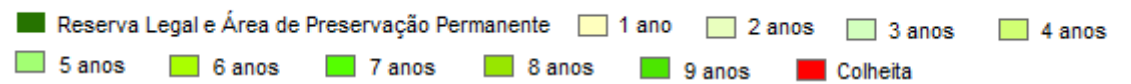
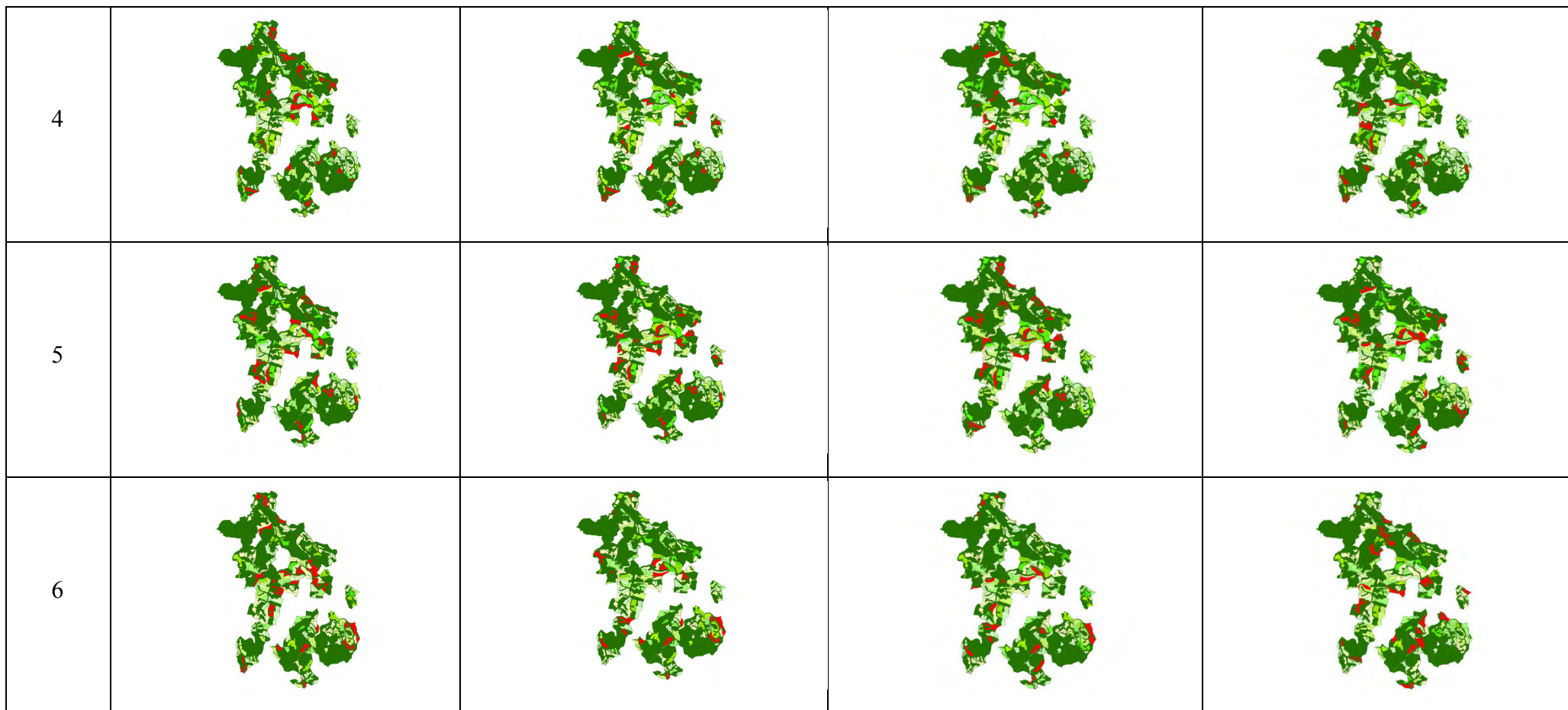


Figura 5.6: Valores de IAC referentes às distâncias entre as unidades de manejo com corte.

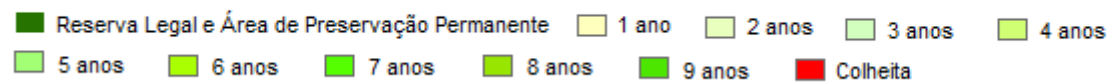
Período	Sem Restrição de Adjacência	Com restrição de Adjacência	Minimização da variação das distâncias entre UM	Minimização da variação das distâncias entre UM e entrega
1				
2				
3				

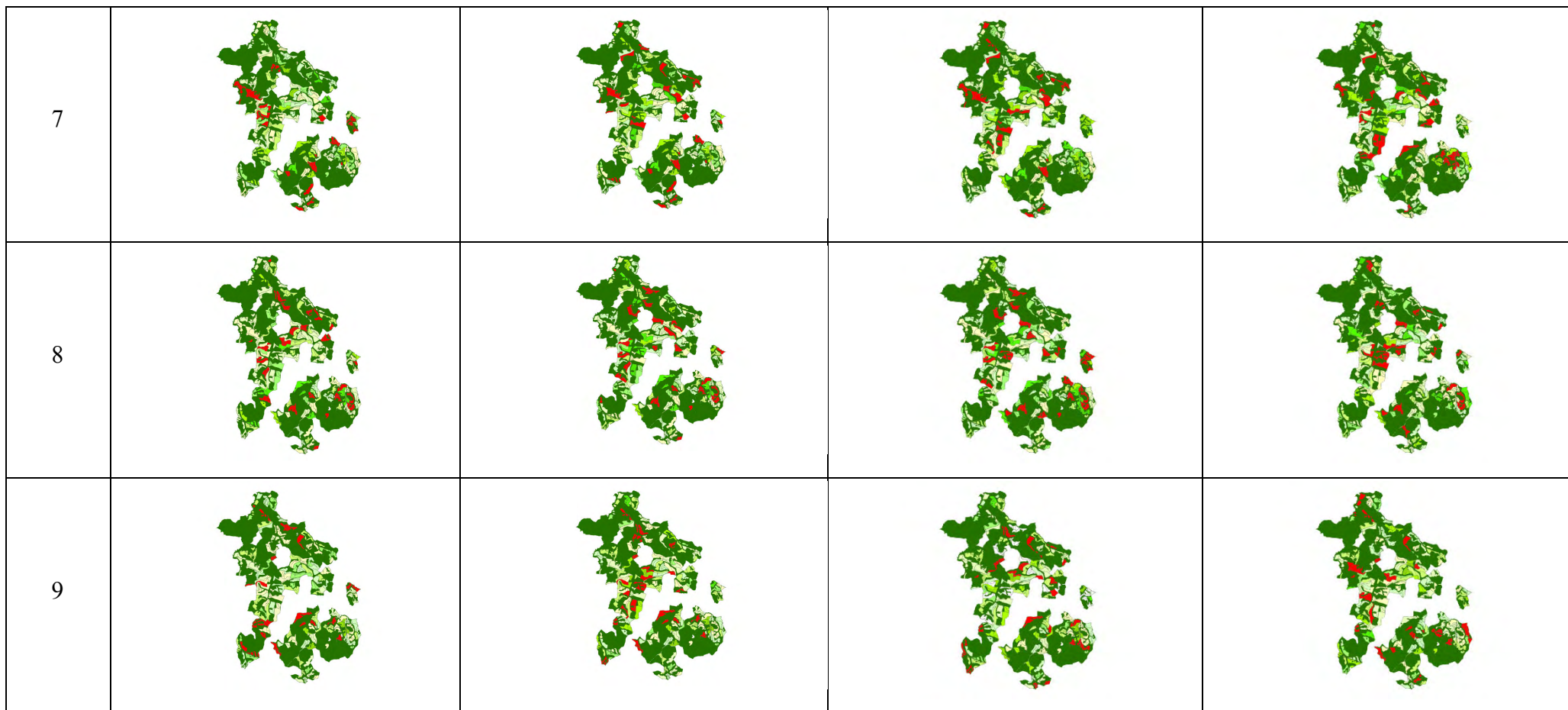
Legenda:



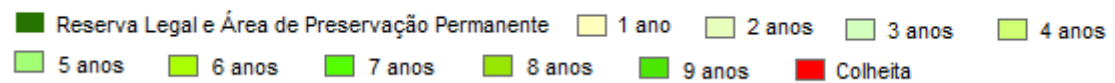


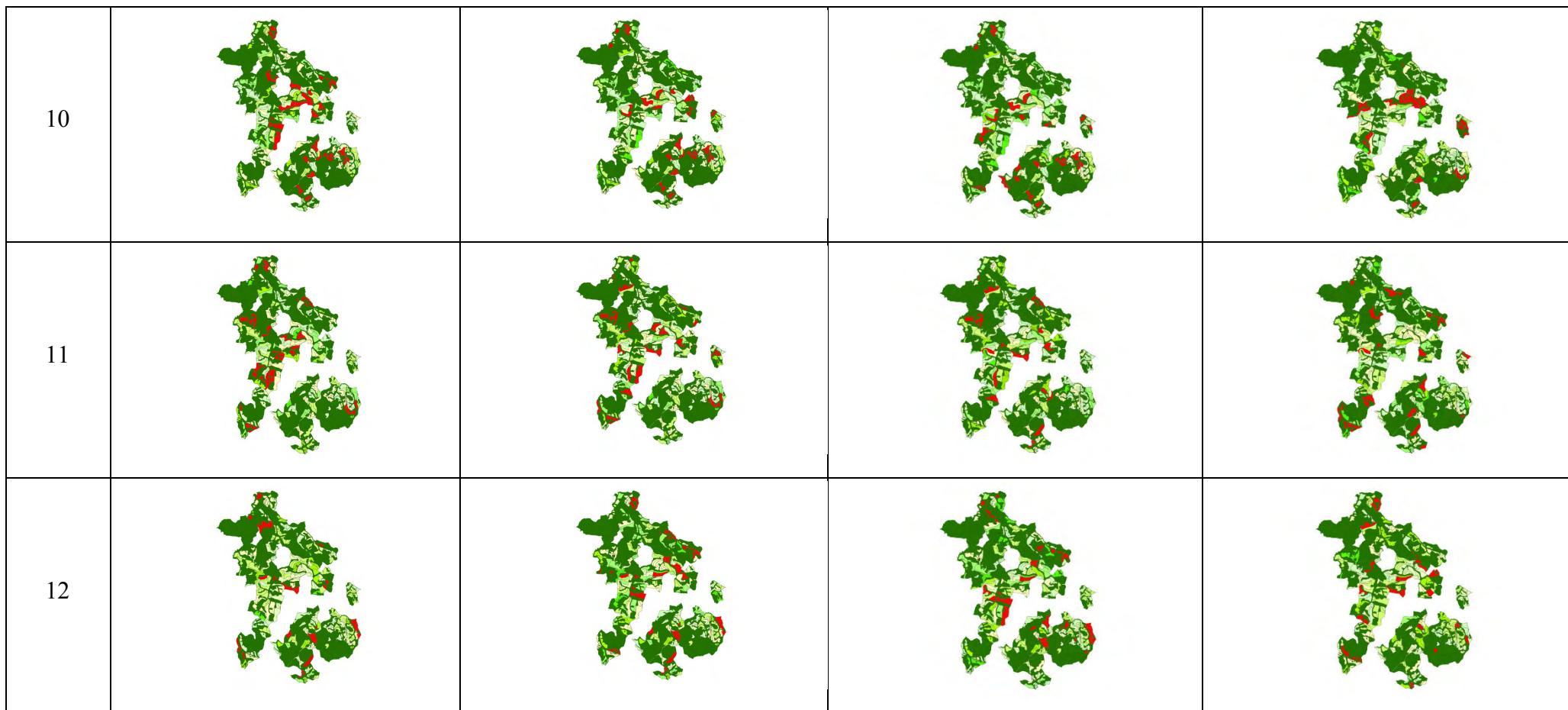
Legenda:



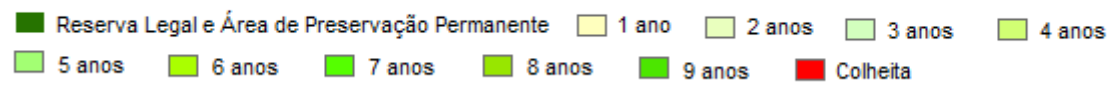


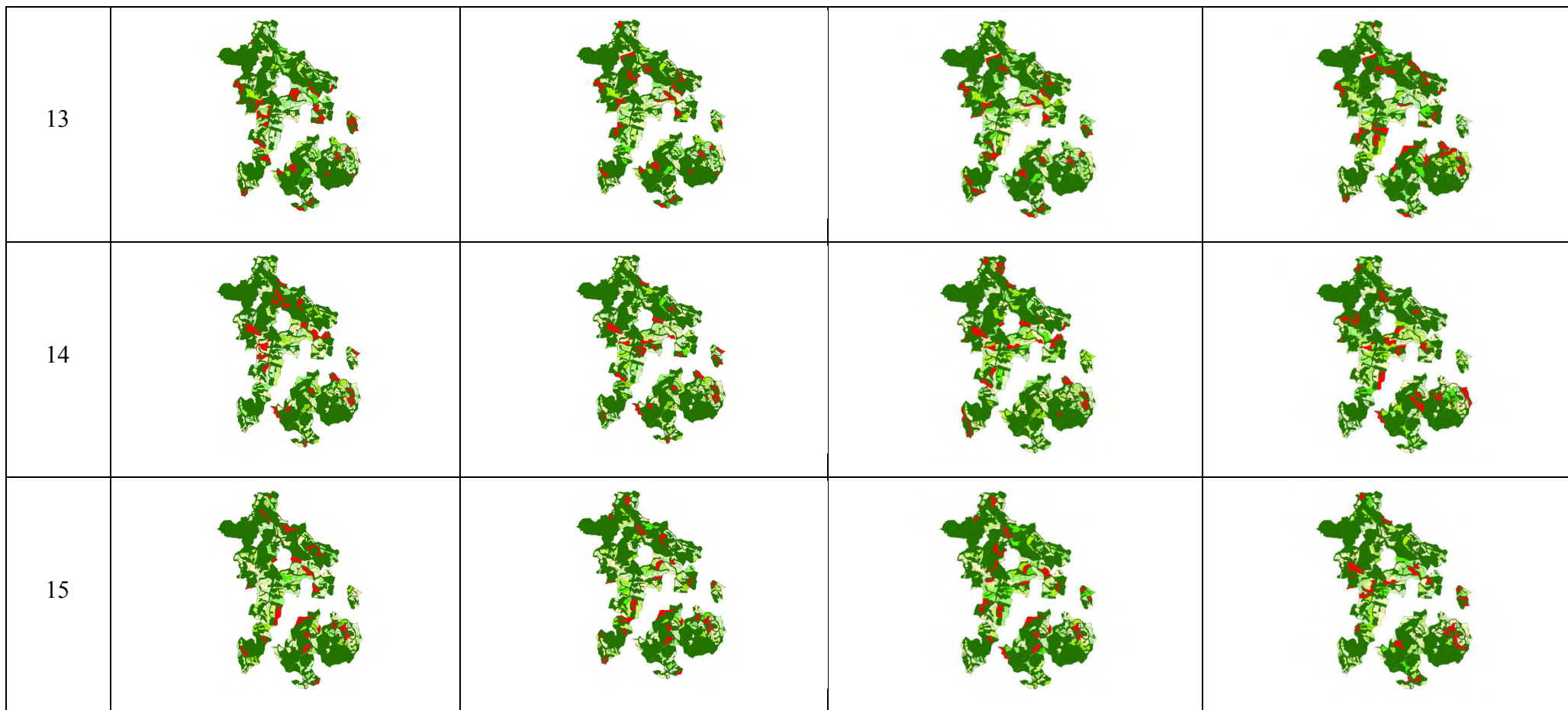
Legenda:



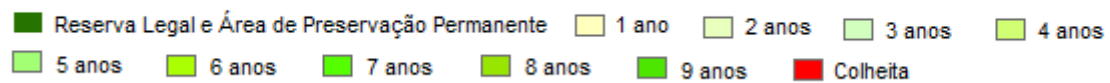


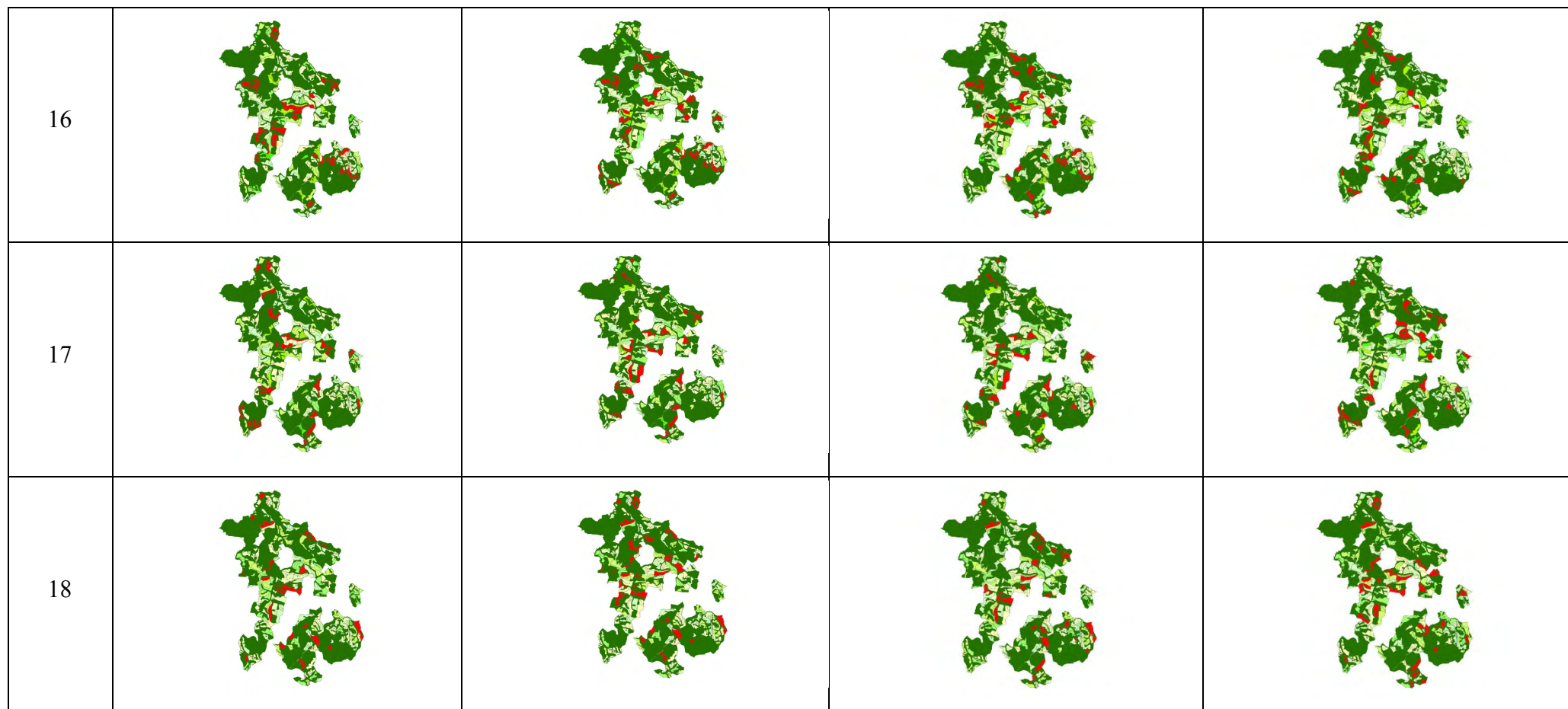
Legenda:





Legenda:





Legenda:

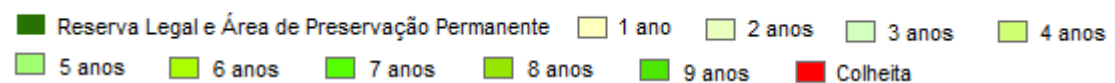


Figura 5.7: Distribuição espacial das classes de idade do modelo com adjacência, minimização do IAC e o modelo de regulação clássica.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A paisagem florestal é formada por um mosaico de unidades de manejo distintas que se interagem funcionalmente (Turner, 1989). A interação entre as unidades de manejo decresce drasticamente com a distância (Strange et al., 2002). Neste estudo são apresentadas alternativas para inclusão das distâncias entre unidades de manejo em um modelo de regulação florestal.

A principal forma de aplicação de restrições ambientais nos modelos de regulação florestal consiste na aplicação de restrições de adjacência (Castro, 2007; Moreira, 2008). Uma dificuldade da implementação dessas restrições, consiste na dimensão que o modelo de regulação assume, exigindo um enorme esforço computacional (Baskent e Keles, 2005). Outra desvantagem na utilização dessas restrições consiste na complexidade adicionada ao problema, muitas vezes, não apresentando soluções factíveis (Castro, 2007).

A regularização da distância entre as unidades de manejo em situação de corte e o posto de entrega da madeira, procura pulverizar a colheita, distribuindo esta por toda a floresta. Essa forma de modelagem apresentou-se satisfatória para a solução do problema tratado nesse estudo, podendo substituir a modelagem com restrições de adjacência. A aplicação de penalidades ao modelo em função das variações das restrições apresenta uma melhoria econômica com relação ao modelo de adjacência, contudo o benefício ambiental é reduzido.

A maximização das distâncias entre as unidades de manejo com intervenção apresentou uma melhoria no valor do IAC e uma redução do VPL, quando comparado com o modelo clássico. Os demais modelos que consideraram a manutenção da distância entre as unidades de manejo constante, ou permitindo variações, não apre-

sentaram soluções satisfatórias para essas restrições, ou seja, o resultado da função objetivo apresenta reduções em função das penalidades pelo fato dessas soluções não suprirem as necessidades destas restrições. Contudo a solução obtida com a aplicação desses modelos apresentou valores de IAC e VPL similares ao modelo com restrições de adjacência, sendo esta uma alternativa promissora para a inclusão de características ambientais em modelos de regulação florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarts, E.; Lenstra, J. K. Introduction. In: Aarts, E., ja Lenstra, J. K. (eds.) **Local search in combinatorial optimization**. John Wiley & Sons, New York, p. 1-16. 1997.
- Bare, B. B.; Mendoza, G. A. Timber harvest scheduling in a fuzzy decision environment. **Canadian Journal of Forest Research**, v.22, p. 423 - 428. 1992.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G.A. Spatial wood supply simulation modelling. **Forestry Chronicle**, v. 67(6) p.610-621. 1991.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Characterising spatial structure of forest landscape. **Canadian Journal of Forest Research**, v.25, p.1830-1849. 1995.
- Baskent, E. Z.; Jordan, G. A. Forest landscape management modelling using *simulated annealing*. **Forest Ecology and Management**, v. 165 p.29-45. 2002.
- Baskent, E. Z.; Keles, S. Spatial Forest Planning: A review. **Ecological Modelling**, v.188, p. 145-173. 2005.
- Bettinger, P.; Sessions, J.; Boston, K. Using tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game. **Ecological Modelling**, v.42, p 111-123. 1997.
- Bevers, M., Hof, J. Spatially optimizing wildlife habitat edge effects in forest management linear and mixed-integer programs. **Forest Science**, v.45 (2), p.249–258. 1999.
- Bettinger, P.; Graetz, D.; Boston, K.; Sessions, J.; Chung, W. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. **Silva Fennica** 36: 561–584. 2002.

Bettinger, P.; Boston, K.; Kim, Y-H; Zhu, J. Landscape-level optimization using tabu search and stand density-related forest management prescriptions. **European Journal of Operational Research**, v. 176 p.1265–1282. 2007

Castro, R. R. **Regulação de Florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

Church, R. L.; Murray, A. T.; Weintraub, A. Locational issues in forest management. **Location Science** v.6, p.137–153. 1998.

Heinonen, T. **Developing spatial optimization in forest planning**. Dissertations Forestales 34f. Faculty of Forestry, University of Joensuu. 2007.

Hiller, F. S., Lieberman, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8ª edição, McGraw-Hill, 2006. 828p.

Leuschner, W. A. Introduction to forest resource management. New York: John Wiley and Sons, 1984. 284p.

Lockwood, C.; Moore, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 23, p. 468-475. 1993.

McDill, M. E.; Braze, J. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age-class distributions. **Forest Science**, v.46, p. 423–436. 2000.

Moreira, J. M. M. A. P. **A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais**. 2008. 123f. Dissertação (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2008.

Murray, A., Church, R. Heuristic solution approaches to operational forest planning problems. **Operation research Spektrum**, v.17, p.193-203, 1995.

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

Pukkala, T.; Kurttila, M. Examining the performance of six heuristic search techniques in different forest planning problems. **Silva Fennica**, v.39(1), p. 67-80. 2005.

Richards, E. W.; Gunn, E. A. Tabu search design for difficult forest management optimization problems. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33(6), p.1126-1133. 2003.

Rodrigues, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 2001. 225f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L. Soluções de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando busca tabu. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.5, p.701-713, 2003.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Ribeiro, C. A. A. S. Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.2, p.247-256, 2004a.

Rodrigues, F. L.; Leite, H. G.; Santos, H. N.; Souza, A. L.; Silva, G. F. Metaheurística algoritmo genetic para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.22, n.2, p.233-245, 2004b.

Strange, N.; Meilby, H.; Thorsen, J. T. Optimizing land use in afforestation areas using evolutionary self-organization. **Forest Science**, v.48, p.543–555. 2002.

Turner, M. G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. **Annu. Rev. Ecol. Syst.**, v.20, p.171-197. 1989.

Wang, Y.; Zhang, X. A dynamic modeling approach to simulating socioeconomic effects on landscape changes. **Ecological Modelling**, v. 140, p.141–162. 2001

CONCLUSÕES GERAIS

A aplicação da técnica de algoritmo genético é eficiente para a solução de modelos de regulação florestal com restrições e objetivos de caráter socioeconômico e ambiental.

A comparação da variação volumétrica satisfaz à demanda de produção imposta em todos os modelos propostos neste estudo.

A inclusão de objetivos de caráter social e ambiental acarreta redução no valor presente líquido global, quando comparado com alternativas clássicas de regulação.

A proposta da minimização do índice de área de colheita (IAC) é econômica e ambientalmente mais satisfatório que a imposição de restrições de adjacência, e resulta em uma redução significativa no número de restrições.

A aplicação de penalidades do IAC acima de 20 %, sobre a maximização do VPL, resulta em valores de IAC melhores do que o modelo de adjacência e valores de VPL superiores.

A regularização da distância entre as unidades de manejo em situação de corte e o posto de entrega da madeira, tende a pulverizar a colheita, distribuindo esta por toda a floresta.

A maximização das distâncias entre as unidades de manejo com intervenção resulta em melhoria no valor do IAC e redução do VPL, quando comparado com o modelo clássico de regulação florestal.