**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização
para o planejamento de florestas industriais**

José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de Concentração:
Economia Aplicada

**Piracicaba
2008**

José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira
Engenheiro Florestal

A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais

Orientador:
Prof. Dr. **LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ**

Tese apresentada para a obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de Concentração:
Economia Aplicada

**Piracicaba
2008**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Moreira, José Mauro Magalhães Ávila Paz

A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais / José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira.- - Piracicaba, 2008.

123 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Economia florestal 2. Heurística – Técnicas 3. Manejo florestal 4. Modelos matemáticos 5. Planejamento florestal 6. Programação linear I. Título

CDD 634.92

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Bahá'ú'lláh, pela dádiva da vida e por todas as bênçãos que já me foram ofertadas ao longo da minha trajetória.

A minha amada família, meus irmãos Hilana, Ana Gerda, Natália, Hildernando Filho, e Jerônimo pelo carinho e amizade. Aos meus adorados pais, Ana América e Hildernando, pelo seu apoio incondicional aos meus projetos e pelo exemplo de vida e perseverança. Aos meus avós, Gerarda, Luis Mauro (*In Memoriam*) e José Louro, pelas lições que me acompanham até os dias de hoje. Aos meus sogros, Terezinha e Jesumiro, meus cunhados Rose, Fábio, Eliane e Otávio, e meus sobrinhos Bruna e Fábio Augusto, pelo seu apoio, carinho e compreensão. E principalmente a minha esposa, Ângela, minha filha Sofia, e ao bebê que está a caminho, pelo apoio irrestrito, compreensão abnegada nos muitos momentos em que me fiz ausente durante esses quatro anos, alegria contagiante, cumplicidade e amor incondicional, sem os quais o caminho trilhado ao longo dessa etapa teria sido penosamente árduo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Carlos Estraviz Rodriguez, pelas orientações, conselhos, conversas esclarecedoras e desafios propostos, os quais enfrentamos juntos. Pela sua confiança, pelas oportunidades que me foram proporcionadas, e por sempre me incentivar a fazer o meu melhor, em uma eterna busca pela superação e excelência.

Aos professores do curso de pós-graduação em Economia Aplicada da Esalq/USP, cujas lições e ensinamentos foram de fundamental importância para a minha formação e a conclusão dessa tese.

As funcionárias da secretaria de Pós-Graduação em Economia Aplicada da Esalq/USP, Maielli, Cida e Paula, pelo auxílio sempre presente e pró-ativo nas questões burocráticas necessárias ao cumprimento dos trabalhos.

Aos amigos de curso, Marcelo, Luciano, Sidnei, Sérgio, Arlei, Carlos, Cezinha, Rodolfo, Adrian, Takao, Guilherme, Jonas, Madalena, Piedade, Sheila, Margarida, Joaquim, e tantos outros, pelos momentos felizes que passamos juntos, e pela companhia nos momentos não tão felizes que enfrentamos durante a caminhada.

Aos colegas do Laboratório de Métodos Quantitativos do Departamento de Ciências Florestais, que me acompanharam durante parte do trajeto, pelas descontraídas e proveitosas conversas.

A Silvana, Carolina, Matheus, Rodrigo, Lana, Jaqueline, Gustavo e todos os demais companheiros da Savcor Forest, pelo seu apoio durante o último ano da conclusão do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa a mim conferida durante três dos quatros anos de curso.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro para aquisição de programas e equipamentos de computação que possibilitaram a execução do projeto de pesquisa.

Aos amigos Emilia, Ângela, João, Simone, Dayan e Henri, da Comunidade Bahá'í de Piracicaba, e Orisson, Sônia, Oscar e Gladis, da Comunidade Bahá'í de Brasília, pela amizade e apoio.

A todos, o meu muito obrigado, de todo coração.

José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	10
Referências.....	12
2 A INCORPORAÇÃO DE CORREDORES DE CONECTIVIDADE EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DE FLORESTAS INDUSTRIAIS: uma revisão	13
Resumo	13
Abstract	13
2.1 Introdução	14
2.2 Aumento da taxa de extinção das espécies.....	15
2.3 Corredores de conectividade	18
2.4 Incorporação de questões espaciais no manejo otimizado de florestas	21
2.4.1 Restrições de Adjacência	24
2.4.2 Restrições espaciais de conectividade	27
2.5 Conclusão	31
Referências.....	32
3 A INCORPORAÇÃO DE CORREDORES DE CONECTIVIDADE EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DE FLORESTAS INDUSTRIAIS: uma abordagem de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).....	38
Resumo	38
Abstract	38
3.1 Introdução	39
3.2 Material e Métodos	43
3.2.1 Desenvolvimento do Modelo Matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM)	43
3.2.2 Estudos de caso.....	48
3.2.2.1 Fazenda Empresarial	48
3.2.2.2 Parque Estadual Anhanguera.....	51
3.3 Resultados e discussão.....	54

3.3.1Fazenda Empresarial	54
3.3.2Parque Estadual Anhanguera.....	59
3.4 Conclusões	62
Referências	63
4 A INCORPORAÇÃO DE CORREDORES DE CONECTIVIDADE EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DE FLORESTAS INDUSTRIAIS: uma abordagem da Heurística da RazãoR.	66
Resumo	66
Abstract	67
4.1 Introdução	67
4.2 Material e Métodos	73
4.2.1Fonte de dados	73
4.2.2O método proposto para avaliação do déficit de conectividade.	76
4.2.3O modelo utilizado para o cálculo da heurística.	77
4.3 Resultados e Discussão	82
4.4 Conclusões	90
Referências	92
ANEXOS	114

RESUMO

A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais

A consideração de condicionantes espaciais em modelos de otimização matemática para lidar com o manejo de florestas públicas e privadas é cada vez mais comum. Um desses condicionantes é a imposição de corredores de conectividade para o abrigo e movimentação da fauna e flora, principalmente devido ao elevado grau de fragmentação das áreas de vegetação nativa, o qual exerce um forte impacto na probabilidade de sobrevivência de várias espécies no longo prazo. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de metodologias auxiliares que permitam ao gestor florestal garantir uma conectividade mínima entre fragmentos de vegetação nativa utilizando unidades de manejo da floresta de produção com determinadas características, interligando fragmentos adjacentes a floresta de produção concomitantemente com a produção de bens e serviços florestais. Duas técnicas foram consideradas; um modelo matemático de programação linear inteira mista e uma heurística denominada heurística da RazãoR. Os dois métodos consideraram o estabelecimento de corredores de conectividade em todos os períodos do horizonte de planejamento simultaneamente, e as equações inseridas permitem ao gestor controlar a qualidade das unidades de manejo aptas a formar o corredor. O modelo de programação linear inteira mista proposto para resolução desse problema faz uso de uma importante propriedade da programação em redes, permitindo a inserção das restrições de conectividade sem adicionar variáveis binárias além daquelas necessárias ao modelo sem conectividade. A solução ótima foi obtida tanto o problema com incorporação de conectividade como para o problema sem conectividade, sendo a diferença entre valores das respectivas funções objetivo o custo de oportunidade do estabelecimento dos corredores. Na heurística da RazãoR, utilizou-se um algoritmo recursivo baseado na Teoria de Grafos e na programação dinâmica para se avaliar o déficit de conectividade das soluções. Dois estudos de caso foram utilizados para a aplicação das técnicas propostas, uma fazenda de uma empresa de celulose do estado de São Paulo, denominada Fazenda Empresarial, e o Parque Estadual Anhanguera. Os dois métodos alcançaram o objetivo de elaborar planos otimizados de manejo florestal estabelecendo uma conectividade mínima entre os fragmentos de vegetação nativa. O custo avaliado para o estabelecimento da conectividade da Fazenda Empresarial foi de 0,051% do valor da função objetivo do problema sem conectividade. A heurística mostrou-se eficaz em encontrar ótimas soluções viáveis, com valores da função objetivo variando de 99,71% a 99,83% do valor encontrado pelo modelo de programação linear inteira mista, após um número médio de 48 iterações. Entretanto, o tempo médio para a heurística encontrar uma solução para o problema foi de dez minutos e vinte e cinco segundos, sendo cinco vezes superior ao tempo necessário para o modelo matemático retornar a solução ótima (um minuto e cinquenta e quatro segundos). A provável causa do baixo desempenho da heurística em termos de tempo para encontrar uma solução se encontra no método de programação que não buscou gerar um código rápido, deixando espaço no futuro para melhorias quando problemas de maior escala precisem ser resolvidos e a solução de grandes problemas de programação linear inteira mista não possa ser encontrada pelos softwares convencionais.

Palavras-chave: Economia florestal; Manejo florestal; Corredores ecológicos; Programação linear inteira mista; Métodos heurísticos; Restrições espaciais

ABSTRACT

Incorporation connectivity corridors into optimization problems for the planning of industrial forests

The consideration of spatial constraints into mathematical optimization models to deal with the management of public and private forests is increasingly common. Due to the increasing fragmentation of natural forests and decreasing species survival's probability, an important constraint considers the existence of corridors that work as shelters to allow for the movement and exchange of fauna and flora species. The aim of this paper is the development of auxiliary methodologies to support forest manager in creating a minimal net of corridors formed by industrial forest stands with certain characteristics that connect industrial stands and still conciliate production and environmental concerns. Two techniques were considered; a mixed integer linear programming model and a heuristic procedure called the R-ratio method. Both techniques dealt with the simultaneous incorporation of connectivity corridors over all planning periods in the planning horizon, and allowed the manager to control the quality of the forest stands that can take part of the corridors. The mixed integer linear programming model created to solve this problem relies on an important property of network optimization models, allowing the insertion of the connectivity restrictions without increasing the number of binary variables already present in the model with no connectivity constraints. The optimal solution was achieved in both models, and the difference between the two objective functions revealed the opportunity cost of establishing the corridors. In the R-ratio heuristic, a recursive algorithm based on Graph Theory and on dynamic programming was used. The technique was applied in two cases, a farm owned by a pulpwood company in the State of São Paulo, referred to as the Company Farm, and the Anhanguera Forest State Park. Both methods optimized the objective and produced forest management plans that resulted in minimal connectivity among all fragments of native forests. The cost of creating corridor on the Company Farm represents 0,051% of the total objective function value for the no connectivity formulation. The R-ratio heuristic was effective in finding good viable solutions to the problem, with values to the objective function varying from 99,71% to 99,83% of the value found to the optimal solution of a mixed integer linear programming, after an average of 48 iterations. Meanwhile, the heuristic took an average time of ten minutes and twenty five seconds to find a viable good viable solution, representing five times the time required by the mixed integer formulation to find an optimal solution. The probable cause of this low performance in terms of time to find a solution is that the heuristic was not programmed to efficiently generate fast executable codes, leaving space for future improvements if necessary when dealing with large scale problems and in the absence of conventional software capable of dealing with large scale mixed integer linear programming problems.

Keywords: Forest economics; Forest management; Ecological corridors; Mixed integer; Linear programming; Heuristic methods; Spatial restrictions

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a preservação do meio ambiente e a busca por sistemas produtivos ecologicamente viáveis têm se apresentado como uma demanda contemporânea da sociedade mundial, inclusive a brasileira. A sociedade como um todo e o próprio setor produtivo já se ocupam em discussões sobre o uso responsável dos recursos naturais e promovem esforços para gerar conhecimento e tecnologias que permitam atingir este objetivo.

Dentre as várias preocupações relevantes ao tema da conservação da biodiversidade, uma que tem recebido destaque é o elevado grau de fragmentação das áreas de florestas nativas, causando o isolamento de várias populações da fauna e da flora brasileira em ilhas de habitat, com conseqüente isolamento destas comunidades. Primack e Rodrigues (2001) alertam sobre o aumento da probabilidade de extinção de comunidade isoladas no longo prazo, especialmente devido ao aumento do cruzamento entre parentes e a elevação da manifestação de genes deletérios na população, além de torná-la mais susceptível a eventos aleatórios com grandes impactos locais negativos tais como incêndios e doenças.

De acordo com Arruda (2004), conectar esses fragmentos para permitir a troca de genes entre suas populações constitui uma das estratégias para viabilizar a conservação da espécie no longo prazo. A efetividade de tais áreas de conexão como corredores ecológicos dependerá do tipo de vegetação das mesmas e da(s) espécie(s) de interesse a serem conservadas (HORSKINS et al., 2006).

É comum a existência de fragmentos de florestas nativas ao lado de áreas cultivadas com florestas de produção. Florestas plantadas vizinhas a fragmentos florestais podem diminuir os danos do efeito de borda em tais fragmentos, além de servir como áreas de conectividade entre fragmentos florestais para determinadas espécies da fauna, e de barreira para outras espécies.

A incorporação de questões ambientais e sociais no processo de tomada de decisão sobre as estratégias de manejo florestal fazem parte do cotidiano dos gestores florestais nos dias atuais (DAVIS et al., 2005), sendo necessário o desenvolvimento de

técnicas de manejo e ferramentas capazes de lidar com a complexidade exigida ao se incorporar tais questões.

Surge então o seguinte problema. Seria possível manejar as florestas de produção de tal modo que, além de atender a objetivos econômicos e levar em consideração restrições operacionais da empresa à qual pertence, se garanta sempre uma conectividade mínima entre os fragmentos florestais adjacentes às florestas de produção?

Este trabalho constitui-se essencialmente em uma tese que levanta a hipótese de que o problema de conectividade entre fragmentos naturais pode ser formulado e resolvido com o auxílio de um modelo matemático que incorpore restrições ambientais espaciais. O objetivo principal deste trabalho é garantir a conectividade de fragmentos florestais de vegetação nativa adjacentes a florestas de produção de eucalipto ao longo do tempo. Para que este objetivo seja alcançado, os seguintes objetivos secundários são propostos:

- a) O desenvolvimento de um modelo matemático para otimização do manejo florestal, que incorpore a necessidade de conectividade entre fragmentos adjacentes ao plantio, para servir de ferramenta auxiliar na tomada de decisão do gestor florestal;
- b) Implementação de uma técnica heurística para lidar com problemas de larga escala, denominada heurística da Razão R;

A tese encontra-se dividida em três capítulos além desta introdução. No primeiro, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema. O segundo capítulo traz um modelo de programação linear inteira mista que permite lidar com o problema em questão. No terceiro capítulo são apresentadas e discutidas as implementações necessárias para que a heurística da Razão R possa solucionar o problema.

Referências

- PRIMACK, R.B.; RODRIGUES, E. **Biologia da Conservação**. Londrina: E. Rodrigues, 2001. 328p.
- ARRUDA, M.B. Corredores Ecológicos d.o Brasil – Gestão Integrada de Ecossistemas. In: ARRUDA, M.B.; NOGUEIRA, L.F.S. **Corredores ecológicos**: uma abordagem integradora de ecossistemas no Brasil. Brasília: IBAMA, 2004. p. 11-46
- HORSKINS, K.; MATHER, P.B.; WILSON, J.C. Corridors and connectivity: when use and function do not equate. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 21, n. 5, jul. 2006. Disponível em: <http://www.springerlink.com.w10077.dotlib.com.br/content/84qq533865702442/fulltext.pdf>. Acesso em: 20 nov 2006.
- DAVIS, L.S.; JOHNSON, K.N.; BETTIGER, P.; HOWARD, T.E. **Forest management**: to sustain ecological, economic, and social values. 4th ed. Long Grove; Waveland Press, , 2005. 804p .

2 A INCORPORAÇÃO DE CORREDORES DE CONECTIVIDADE EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DE FLORESTAS INDUSTRIAIS: uma revisão

Resumo

O estabelecimento de corredores de conectividade entre fragmentos de vegetação natural apresenta-se como uma das estratégias de conservação da biodiversidade mais difundidas na atualidade. Considerar o estabelecimento desses corredores nos planos de manejo florestal sustentado constitui um dos desafios atuais para os gestores florestais. Nesse trabalho, buscou-se realizar uma revisão sobre a importância dos corredores de conectividade para a conservação da biodiversidade, o porquê da necessidade de implementá-los, quais as suas potenciais vantagens e desvantagens, e quando eles podem não ser efetivos para o estabelecimento de metapopulações. Outro assunto correlato abordado no artigo é o avanço e a importância da incorporação de questões ambientais espaciais no planejamento otimizado do manejo de florestas de produção, especialmente o estabelecimento de corredores de conectividade entre os fragmentos adjacentes às florestas industriais. O tema é tratado de modo a apresentar uma evolução das técnicas e abordagens utilizadas na literatura mundial para lidar com o problema nas últimas décadas, caracterizando o estado da arte da pesquisa sobre o problema. A maioria dos trabalhos encontrados trata a incorporação da conectividade sob uma perspectiva ambiental e considerando um período de tempo na sua análise. Trabalhos considerando a incorporação da conectividade mantendo os objetivos tradicionais de maximizar a produção ou o lucro sob um horizonte de planejamento multitemporal ainda são raros na literatura mundial, evidenciando um espaço para contribuições científicas nesse sentido.

Palavras chave: Corredores ecológicos; Programação linear inteira mista; Manejo florestal otimizado; Restrições espaciais

Abstract

The establishment of connectivity corridors among native fragments of vegetation represents one of the most widespread strategies of biological conservation nowadays. The consideration of such corridors in forest management plans is one of the current challenges for forest managers. The aim of this paper is to review the biological conservation importance of this subject, the need for its establishment, the potentials upsides and downsides, and the effectiveness in connecting wild populations to create metapopulations. Another related topic presented in this paper is the evolution and the importance of inserting spatial environmental constraints into optimization forest management planning problems, specially the ones dealing with connectivity corridors

adjacent to industrial forests. An evolution of the techniques and methods found in the international literature to deal with the problem on the last two decades is also presented. Most of the studies found incorporate connectivity with a conservation perspective and consider just one period of time in the analysis. Papers that try to incorporate connectivity corridors simultaneously with conventional objective functions like maximum profit or production in a multi-period planning horizon are rare and signal an opportunity for new research in this field.

Keywords: Ecological corridors; Mixed integer linear programming; Optimized forest management; Spatial restrictions

2.1 Introdução

A preocupação com as questões ambientais, na sociedade contemporânea, já não se restringe apenas aos grupos de organizações não governamentais ambientalistas ou aos órgãos do governo responsáveis pela regulação do uso dos recursos naturais. A sociedade como um todo e o próprio setor produtivo já se ocupam em discussões sobre o uso responsável dos recursos naturais e estão procurando adequar os seus processos produtivos a esta nova realidade. O aumento da taxa de extinção das espécies no último século constitui uma dessas questões ambientais.

O planejamento do manejo de florestas de produção tem evoluído juntamente com as demandas da sociedade, passando a incorporar questões ambientais e sociais no seu escopo, além dos objetivos tradicionais de produção de bens e serviços e obtenção de lucros.

O objetivo desse trabalho é realizar uma revisão de literatura sobre o problema de incorporação da conectividade no manejo de florestas e no planejamento da paisagem, porque é importante implementá-la, suas vantagens e desvantagens para a conservação da biodiversidade, e como os pesquisadores da área de planejamento florestal têm buscado incorporar as questões ambientais de destruição e fragmentação do habitat no manejo das florestas ao redor do mundo.

O artigo é composto por quatro seções além dessa introdução. Na segunda seção o problema do aumento da taxa de extinção das espécies é abordado, em seguida uma explanação sobre os corredores de conectividade que constituem uma das estratégias para possibilitar o aumento da probabilidade de sobrevivência das espécies em habitats

fragmentados é apresentada, a quarta seção trata das estratégias e soluções para incorporar questões ambientais no planejamento do manejo florestal, e encerrando com algumas considerações sobre os assuntos abordados.

2.2 Aumento da taxa de extinção das espécies

A maioria das alterações contemporâneas nos estados e fluxos da biosfera é consequência das ações humanas, muitas delas resultando em degradação ambiental (MEYER; TURNER, 1994). Dentre as consequências dos processos de degradação ambiental, uma que preocupa os ambientalistas e pesquisadores da área ambiental é o aumento da taxa de extinção de espécies no último século, em especial por ser resultado do aumento da atividade antrópica no planeta.

Primack e Rodrigues (2001) expõem que a taxa de extinção das espécies de pássaros e mamíferos passou de uma espécie por década no século XVI, para uma espécie por ano entre os séculos XIX e XX. Também alertam que, embora a extinção de espécies seja um processo natural, mais de 99% das atuais extinções foram consequência de atividades humanas.

As principais causas de extinção de espécies resultantes das atividades humanas são a destruição, fragmentação e degradação do habitat, além da superexploração de espécies para uso humano, a introdução de espécies exóticas e o aumento da ocorrência de doenças, e que a maioria das espécies ameaçadas de extinção atualmente enfrentam, pelo menos, dois desses seis tipos de problema (PRIMACK & RODRIGUES, 2001).

A destruição do habitat natural das espécies é a principal ameaça a manutenção da diversidade ecológica, e ocorre principalmente como resultado das atividades econômicas em larga escala que, associadas a uma economia global com uma crescente demanda por bens e serviços, utilizam os recursos naturais para a sua elaboração. A pecuária, a agricultura, a silvicultura, a mineração, a pesca comercial, a fabricação e construção de represas estão entre as atividades econômicas em larga escala que promovem a destruição do habitat natural das espécies (MEYER & TURNER, 1994).

Após a destruição do habitat, a segunda maior causa de perda de biodiversidade é a fragmentação do habitat natural das espécies. Primack e Rodrigues (2001) afirmam que o processo de fragmentação do habitat ocorre quando uma contínua área de habitat tem a sua área reduzida e é subdividida em dois ou mais fragmentos. Esses passam a diferir de suas áreas originais em dois aspectos importantes, possuem mais borda por área de habitat e suas bordas passam a se localizar mais próximo do centro dos fragmentos.

Enquanto a destruição do habitat ameaça a existência das espécies de forma clara e direta, as ameaças oriundas da fragmentação do habitat se apresentam de forma mais sutil. Primeiramente, a fragmentação limita o potencial de uma espécie para dispersão e colonização, uma vez que a área de atuação de algumas espécies pode ficar restrita ao fragmento, com reduzida probabilidade de alcançar novos habitat para colonização.

Segundo, reduz a capacidade de alimentação dos animais nativos; uma vez que a área foi reduzida, reduziu-se também a disponibilidade de alimento e outros recursos provindos das áreas naturais, diminuindo a capacidade do local de suportar as populações em suas dimensões originais.

Terceiro, a fragmentação pode dividir populações em larga escala em duas ou mais sub-populações isoladas, as quais sofrerão uma perda de variabilidade genética, tornando-se mais susceptíveis a extinção.

O aumento da borda do habitat decorrente da fragmentação aumenta a incidência de ventos, calor, perda de umidade e excesso de luminosidade na área fragmentada, e como várias espécies de plantas e animais são adaptados a condições de temperatura, umidade e luminosidade bem específicas, tais espécies não sobrevivem nas bordas do fragmento, reduzindo o seu número de espécies e ocasionando a perda de biodiversidade (PRIMACK; RODRIGUES, 2001).

Rich et. al. (1994) avaliaram o efeito da largura de corredores abertos em áreas florestais localizadas no sul de Nova Jersey na abundância relativa e composição da comunidade de pássaros migratórios neotropicais entre o interior da floresta e a borda dos corredores desmatados para abertura de estradas não pavimentadas (8m de largura), estradas pavimentadas (16 m) e linhas de rede elétrica (23 m). Os autores concluíram que a abundância e composição das espécies entre a borda e o interior da

floresta não foram afetadas de forma significativa para corredores de 8 metros de largura, mas sofreu uma redução significativa nos corredores de 16 e 23 metros, comportando-se de maneira semelhante a áreas de bordas de fragmentos isolados.

Para que as populações possam ser viáveis ao longo do tempo, é necessário que elas possuam um número mínimo de indivíduos que garantam a sua variabilidade genética e a sua sobrevivência em caso de desastres naturais localizados. Shaffer (1981) definiu que uma população mínima viável em um determinado habitat é “a menor população isolada que tenha 99% de chance de continuar existindo por 1000 anos, a despeito dos efeitos previsíveis de estocasticidade genética, ambiental e demográfica, e de catástrofes naturais.”

Primack e Rodrigues (2001) afirmam que as pequenas populações estão sujeitas a um rápido declínio e a extinção especialmente por três motivos: problemas resultantes da perda de variabilidade genética; flutuações demográficas devido a variações das taxas de natalidade e mortalidade; e flutuações ambientais devido às variações de competição, suprimento de alimentos, ocorrência de doenças e ação predatória, bem como de catástrofes naturais como enchentes, incêndios ou secas prolongadas.

Entretanto, se os fragmentos de uma área apresentam-se distribuídos de tal forma e tamanho que, ao ocorrer a extinção local de uma população em um fragmento de tamanho reduzido, a população localizada em outro fragmento de maior dimensão migre para o fragmento menor, colonizando-o, de modo que a dispersão das populações seja algo possível, passamos a ter o que os biólogos da conservação chamam de metapopulação (PRIMACK; RODRIGUES, 2001).

Hess (1994) define metapopulação como “um conjunto de populações distribuídas por um número de fragmentos que são conectados, em graus variáveis, por movimentos de dispersão”. A dinâmica da metapopulação depende da dinâmica das populações dentro dos fragmentos e da dinâmica das populações entre os fragmentos.

A existência de metapopulações pode prevenir a extinção local de algumas espécies. Entretanto, para que isso ocorra, é necessário proteger e assegurar a viabilidade das comunidades nos fragmentos com populações permanentes, bem como garantir a conectividade entre os fragmentos que compõem o habitat da metapopulação.

2.3 Corredores de conectividade

Uma das alternativas para estabelecer ou melhorar a qualidade da conectividade entre fragmentos de habitat natural de uma determinada paisagem é a implantação de corredores de fauna e flora, os chamados corredores ecológicos, que buscam conectar os fragmentos remanescentes reduzindo a taxa de extinção (GALINKIN et al., 2004).

O objetivo de um corredor é conectar populações de fragmentos separados, permitindo o aumento da população viável e facilitando o fluxo genético, possibilitando a recolonização dos fragmentos com populações de tamanho reduzido, resultando num aumento do tamanho e das chances de sobrevivência das populações de várias espécies, além de reduzir a pressão do entorno sobre as áreas protegidas (ARRUDA, 2004; FONSECA et al., 2004). Caso uma metapopulação já esteja estabelecida em um conjunto de fragmentos, a implementação de corredores de conectividade podem aumentar a sua dinâmica (HESS, 1994). Desse modo, corredores de biodiversidade se destacam como uma estratégia para induzir a transformação de populações isoladas de fragmentos nativos em metapopulações, ou aumentar a dinâmica das metapopulações já existentes.

O Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) (BRASIL, 2000) define corredores ecológicos como “porções de ecossistemas naturais ou seminaturais, ligando unidades de conservação, que possibilitem entre elas o fluxo de genes e o movimento da biota, facilitando a dispersão de espécies e a recolonização de áreas degradadas, bem como a manutenção de populações que demandam para sua sobrevivência áreas com extensão maior do que aquela das unidades individuais”.

Entretanto, a formação de corredores de conectividade também pode trazer efeitos maléficos para as populações dos fragmentos isolados. Simberloff e Cox (1992) alertam que os corredores podem servir de meio de propagação catástrofes naturais, como incêndios, para doenças contagiosas ou outros agentes de extinção, como espécies exóticas que irão promover a predação e/ou competição pelos recursos do fragmento. Também podem aumentar a exposição da população à caça e a predação, especialmente se os corredores forem estreitos.

Hess (1994) simulou a propagação de uma doença contagiosa dentro de uma metapopulação na presença ou ausência de corredores de conectividade, e chegou a conclusão que, de uma maneira geral, uma paisagem com fragmentos conectados sofreu um número menor de extinções de uma metapopulação que uma outra localizada em fragmentos isolados. Entretanto, caso a taxa de mortalidade induzida pela doença seja pequena o suficiente para permitir a sua propagação, e elevada o suficiente para diminuir o número de indivíduos da metapopulação a ponto de torná-la vulnerável às catástrofes naturais e estocasticidade demográfica, a existência dos corredores eleva de forma significativa a probabilidade de extinção da metapopulação. Apesar desses efeitos negativos apontados na literatura, Beier e Noss (1998) concluíram, após o seu estudo de 32 artigos com dados empíricos que estivessem ligados ao tema, que a maioria dos artigos com experimentos bem delineados apresentaram evidências de que os corredores são estratégias valiosas para a conservação da biodiversidade, e que nenhum dos artigos publicados sobre os efeitos negativos¹ dos corredores apresentaram evidências empíricas sobre a ocorrência de tais efeitos.

Damschen et al (2006), ao estudar os efeitos que corredores estabelecidos em paisagens experimentais de aproximadamente 50 ha, localizadas na Carolina do Norte, por cinco anos exerceram na flora do local, encontraram evidências de que as áreas conectadas apresentavam mais espécies de plantas nativas do que fragmentos isolados, de que esta diferença aumenta com o tempo, e que o corredor não promoveu a invasão dos fragmentos por espécies exóticas.

Nasi et. al. (2007) estudaram o impacto do uso das florestas ripárias como corredores de conectividade na diversidade e abundância de primatas em florestas tropicais da Indonésia. A área estudada era composta por fragmentos de habitat natural adjacentes a florestas plantadas de *Acacia magium* para abastecer a indústria de celulose. O estudo evidenciou a importância dos corredores para a manutenção das populações de oito espécies de primatas da área, uma vez que não foi observada a ocorrência de primatas nos plantios florestais bem como nas florestas ripárias que não fossem

¹ Expansão de doenças; espécies exóticas; catástrofes naturais; aumento da exposição das espécies às áreas antropizadas.

adjacentes aos fragmentos. No entanto, os autores não sabem afirmar se os primatas observados nas florestas ripárias adjacentes aos fragmentos estavam utilizando-as apenas como área de passagem ou habitat permanente.

Ao estudar a interação entre as populações de ursos negros residentes nas Florestas Nacionais Ocala e Osceola, no estado da Flórida, conectadas por um corredor de 30km de largura por 90km de extensão, constituído de áreas naturais públicas e privadas em uma matriz de estradas e áreas antropizadas, Dixon et al (2006) detectaram que as populações de ursos negros das duas florestas nacionais haviam constituído uma metapopulação. Para chegar a essa conclusão os autores utilizaram técnicas estatísticas de amostragem e coleta de material genético para verificar se o fluxo de material genético entre as duas populações havia se estabelecido.

Aliar técnicas de amostragem de população com coleta de material genético é algo essencial para determinar se o corredor de conectividade estabelecido entre os fragmentos está realmente exercendo a sua função de permitir a interação entre populações.

A simples ocorrência de uma determinada espécie dentro de um corredor não implica que o mesmo esteja executando a função de aumentar a variabilidade genética das populações de cada fragmento. Horskins; Mather e Wilson (2006) avaliaram a presença e a similaridade genética de duas espécies da fauna australiana em um corredor ecológico de mais de 80 anos, e comparando-as com populações de fragmentos isolados. Os autores encontraram evidências de uso do corredor pelas espécies, mas os marcadores genéticos utilizados para avaliar a variabilidade genética não apresentaram evidências que as populações teriam se tornado uma única população, provavelmente devido à características comportamentais das duas espécies.

Vale salientar que não existem corredores ecológicos ou habitats universais (JORDAN, 2000), pois uma ligação entre dois fragmentos pode servir de corredor para algumas espécies e de obstáculo para outras. O uso do habitat ofertado pelo corredor pela biota, bem como o estabelecimento da interação gênica entre as populações dos fragmentos conectados, dependerá do comportamento das espécies alvo e da matriz que circunda o habitat (SIMBERLOFF; COX, 1987), sendo necessário levar estas duas questões em consideração no processo de planejamento do estabelecimento de corredores de

conectividade, de modo a aumentar a probabilidade dos mesmos se tornarem funcionais após a sua implantação.

Dessa forma, o estabelecimento de corredores de conectividade apresenta-se como uma importante estratégia para a conservação da biodiversidade, constituindo uma condição necessária, mas não suficiente, para o estabelecimento de metapopulações entre populações de fragmentos naturais que estavam isolados antes da implantação dos corredores.

2.4 Incorporação de questões espaciais no manejo otimizado de florestas

O uso sustentável e responsável dos recursos naturais disponíveis, entre estes os recursos florestais, constituem outra preocupação ambiental da sociedade contemporânea. Os profissionais da área de manejo florestal têm sido chamados a vencer o desafio de gerar produtos a partir das áreas com florestas, garantindo a oferta dos serviços ambientais e sociais fornecidos por essas áreas com um mínimo de qualidade preestabelecido, sendo estes objetivos conflitantes na maioria das ocasiões (DAVIS et al., 2005).

Na América do norte as práticas de um manejo florestal sustentável regido por normas não governamentais, de cunho optativo e cujos esforços para conservação da biodiversidade e dos ativos florestais somam-se àqueles determinados pelos governos, já são uma realidade. As regras para a iniciativa florestal sustentável (SFIS) (SUSTAINABLE FORESTRY INITIATIVE, 2005) foca que os seus participantes busquem o contínuo desenvolvimento das práticas de manejo florestal sustentável, da produtividade florestal, e dos processos que melhorem a conservação ambiental necessários à complementação daqueles exigidos pelas leis governamentais.

Estudos ambientais têm sido financiados por outras associações da iniciativa privada ligadas ao setor florestal, visando uma contribuição adicional além daquelas impostas pela legislação ambiental dos seus países. A companhia de papel e celulose Riau Andalan Pulp and Paper, juntamente com o Centro Internacional para Pesquisa Florestal (CIFOR), financiaram um projeto intitulado Biodiversidade em plantações florestais, o qual incluía o trabalho de Nasi et al. (2007), que estudaram o impacto da

utilização de corredores na diversidade de primatas em fragmentos adjacentes a plantios de *Acacia mangium*, localizados na ilha de Sumatra, na Indonésia.

No Brasil, algumas empresas do setor florestal têm desenvolvido parcerias com universidades buscando avaliar e implementar práticas de manejo florestal que sejam mais sustentáveis do ponto de vista ambiental e social. A Companhia Suzano Papel e Celulose já participou de pelo menos dois trabalhos dessa natureza em parceria com a Universidade de São Paulo (Esalq-USP). O primeiro, publicado por Dário e Almeida (2000), avaliou a influência de corredores de conectividade de Mata Atlântica, adjacentes aos plantios de eucalipto da empresa, sobre a avifauna da região; e o segundo avaliou a redução de impactos ambientais ao cultivar florestas de eucalipto de forma integrada com as florestas naturais (AUGUSTI et al., 2005).

Desse modo, a busca de soluções que permitam considerar questões ambientais no planejamento do manejo de florestas de produção vai além daquelas normas mínimas exigidas pela lei dos países. Algumas empresas têm procurado estar um passo a frente e implementar nos seus processos produtivos, por iniciativa própria, um padrão de qualidade ambiental superior ao exigido pela legislação ambiental dos seus países.

Entretanto, o planejamento do manejo de florestas envolve uma interação de sistemas ecológicos, econômicos e sociais (DAVIS et al., 2005), resultando na consideração de uma quantidade de variáveis que inviabiliza a sua realização sem o auxílio de modernas ferramentas de planejamento. Métodos de otimização como a programação matemática, em especial utilizando a programação linear, simulação e implementação de heurísticas, têm sido utilizados pelos gestores florestais como ferramentas auxiliares de planejamento do manejo florestal nas últimas décadas.

Um dos trabalhos pioneiros no uso de programação linear como ferramenta auxiliar para o planejamento do manejo florestal foi publicado por Curtis (1962), ao decidir quais áreas seriam colhidas anualmente visando obter a produção máxima de uma área florestal (BONGIORNO; GILLES, 2003). Para incorporar questões ambientais nos problemas de manejo florestal, é necessário considerar as relações espaciais entre as unidades de manejo da floresta no processo de planejamento. O aumento da quantidade de sedimentos carregados para os cursos d'água, além da perda de qualidade da madeira e a desconsideração de custos adicionais de transporte, são

alguns dos potenciais prejuízos que podem ocorrer caso o gestor florestal não considere o arranjo espacial no planejamento do manejo da floresta (MARTELL; GUNN; WEINTRAUB, 1998).

Thompson et al. (1973) foram pioneiros na introdução de restrições espaciais visando incorporar questões ambientais no planejamento do manejo florestal, ao limitar o tamanho máximo das áreas cortadas continuamente em uma floresta pública no estado de Maryland. Os autores tinham como objetivo obter um fluxo aproximadamente constante de produção de madeira ao longo do tempo, alocando as áreas de colheita em blocos pequenos e dispersos em cada período, de modo a diversificar a cobertura florestal e melhorar a qualidade do habitat para as espécies da fauna silvestre encontradas na floresta.

Atualmente, a incorporação de restrições espaciais na otimização do manejo de florestas públicas e privadas tem se constituído em uma norma nos Estados Unidos e Canadá (BARRET; GILLES; DAVIS, 1998; AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION, 2000), sendo apontadas por Baskent e Keles (2005) e Martell; Gunn e Weintraub (1998) como um dos desafios para futuras pesquisas nas áreas de manejo e gerenciamento florestal e pesquisa operacional.

Tais problemas constituem um desafio pois exigem o uso de variáveis inteiras na formulação do modelo matemático, e dependendo da escala² e dos processos modelados, o número de restrições e variáveis a serem consideradas geralmente ultrapassa a capacidade de resolução dos computadores em um tempo aceitável, pois o número de soluções viáveis cresce exponencialmente com o aumento da duração do horizonte de planejamento. Esse aumento exponencial do número de soluções viáveis caracteriza o planejamento do manejo florestal com considerações espaciais como um problema de natureza combinatorial, e conseqüentemente de difícil resolução (WEINTRAUB; MURRAY, 2006).

Sendo assim, vários pesquisadores têm se dedicado, nas duas últimas décadas, ao desenvolvimento e a avaliação de formulações, algoritmos e heurísticas que fossem

² Nesse trabalho, considera-se que a escala de um modelo matemático de planejamento florestal está associada ao número de unidades de manejo tratadas no problema, associada ao número de regimes de manejo disponíveis para cada unidade de manejo.

capazes de resolver os problemas sugeridos utilizando esforços computacionais consideráveis aceitáveis.

Dois problemas ambientais considerando arranjos espaciais têm recebido destaque na literatura internacional relacionada ao manejo otimizado florestal: o primeiro ficou conhecido como o problema de adjacência, onde as unidades de produção adjacentes a uma unidade de produção cuja colheita foi determinada em um período de tempo t , não podem ser colhidas durante δ períodos, onde δ é o tempo necessário para que a unidade de manejo que foi colhida se regenere; o segundo é o problema de conectividade, onde o planejamento do manejo da paisagem deve considerar a obtenção, ou maximização, da conectividade entre dois ou mais fragmentos de vegetação nativa.

2.4.1 Restrições de Adjacência

Os trabalhos envolvendo restrições de adjacência buscam reduzir o impacto gerado pela destruição ou depredação temporária dos habitats naturais em virtude das atividades de colheita florestal, evitando o corte de áreas adjacentes ou de áreas contíguas extensas, visando prover abrigo e alimento das populações que vivem nas florestas manejadas, com o intuito de aliar conservação e produção nas áreas florestais. O primeiro trabalho a utilizar restrições para não permitir a colheita de florestas de áreas adjacentes foi publicado por Thompson et al. (1973). Vários pesquisadores passaram a se dedicar a esse tema desenvolvendo formulações mais complexas, com o objetivo melhor representar o problema e reduzir o esforço computacional de resolução.

Restrições de adjacência tipicamente exigem a adição de um grande número de linhas e colunas à matriz gerada pelos modelos de programação linear (MENEHIN; KIRBY; JONES, 1988).

McDill e Braze (2000) apresentam 14 tipos de formulações diferentes de restrições de adjacência e citam suas respectivas referências, subdividindo-as em seis grandes grupos. Meneghin; Kirby e Jones (1988) desenvolveram um algoritmo capaz de reduzir em até um quarto o número de restrições necessárias para a implementação do problema de adjacência. Goycoolea et al. (2005) apresentam um enfoque

completamente novo na formulação de tais restrições, baseado na teoria da junção de nós³, muito próximo do que os autores consideram a formulação ideal e com ótimos resultados em termos de eficiência.

A própria compreensão do problema na América do Norte evoluiu bastante na última década, devido à imposição, por razões ambientais, de colheita florestal em uma área contínua máxima⁴. As primeiras formulações do problema consideravam unidades de área de tamanho tal que o corte de duas áreas adjacentes já violaria a área máxima permitida, essas formulações ficaram conhecidas na bibliografia como Modelos Restringidos pela Unidade (URM). Murray (1999) abordou a estratégia de tais áreas serem de tamanhos menores, possibilitando o corte de áreas adjacentes desde que a soma das áreas não ultrapassasse a área máxima permitida, utilizando um modelo não linear para representá-lo. Tais modelos ficaram conhecidos com Modelos Restringidos por Área (ARM). McDill; Rebain e Braze (2002) desenvolveram um algoritmo para representar ARM's como modelos lineares de programação inteira mista (MILP). Goycoolea et al. (2005) foram além e definiram o Modelo Restringido por Área Estendido (EARM), que diferencia a adjacência em dois tipos, forte e fraca, o que altera de modo significativo as soluções propostas pelos modelos.

Aspectos estruturais da floresta considerada também podem influenciar o tempo de solução dos problemas que consideram restrições espaciais. McDill e Braze (2000) observaram que a distribuição das classes de idade da floresta exerce impacto no tempo de resolução do modelo de planejamento, uma vez que modelos com florestas mais velhas são mais difíceis de se resolver do que com florestas juvenis ou ordenadas, pois o número de opções de corte é muito maior nas florestas mais velhas.

A natureza combinatorial que os modelos de planejamento do manejo florestal envolvendo restrições espaciais tem instigado os pesquisadores a buscar diversas técnicas para resolução dos problemas.

Alguns autores preferem métodos heurísticos, mesmo que tais métodos não garantam uma solução ótima. Essa preferência se deve geralmente à redução expressiva do tempo computacional necessário para a resolução de modelos com restrições

³ Do inglês “node packing”.

⁴ A área contínua máxima permitida para colheita pela “Iniciativa Florestal Sustentável” da AF&PA é de 48 ha.

espaciais. As abordagens mais utilizadas envolvem heurísticas desenvolvidas pelos próprios autores (FALCÃO; BORGES, 2002; MURRAY, 1999), ou heurísticas de uso comum em outras áreas, como a busca tabu⁵ (CARO et al., 2003), simulated annealing (LOCKWOOD; MOORE, 1993; ÖHMAN, 2000; ÖHMAN; ERIKSSON, 1998), ou ainda um misto de programação linear e simulated annealing (ÖHMAN; ERIKSSON, 2002).

Outros autores sugerem algoritmos como a programação dinâmica (HOGANSON; BORGES, 1998; BORGES; HOGANSON, 1999), o algoritmo gerador de colunas⁶ (WEINTRAUB; BARAHONA; EPSTEIN, 1994), e modelos de programação linear inteira mista (GOYCOOLEA et al., 2005; MCDILL; BRAZE, 2000, 2001; MCDILL; REBAIN; BRAZE, 2002; REBAIN; MCDILL, 2003) para a resolução dos problemas.

McDill e Braze (2001) argumentam que seria melhor utilizar abordagens baseadas no algoritmo branch and bound (BBA)⁷, pois são mais generalistas e podem ser implementados em programas disponíveis em versões comerciais e de acesso livre. Essa estratégia evita o desenvolvimento de softwares específicos e se apóia em programas já desenvolvidos e em constante evolução, possibilitando a resolução de problemas cada vez maiores e mais complexos na medida em que versões mais elaboradas sejam disponibilizadas no mercado. Também se pode esperar que a redução do esforço computacional para resolução dos problemas diminua ao longo dos anos, uma vez que a capacidade de processamento dos computadores tem crescido de forma significativa.

Rebain e McDill (2003) chamam atenção para um novo problema na abordagem ARM. Ao evitar que áreas contínuas muito grandes sejam abertas em um mesmo período, os modelos passam a indicar a abertura de várias pequenas áreas separadas. Isso provoca um aumento na fragmentação da floresta intensificando o efeito de borda e as suas conseqüências negativas para a fauna e a flora. Os autores desenvolveram um modelo que, além de impedir que áreas muito grandes sejam colhidas em um mesmo período, determina um tamanho mínimo para as áreas que serviriam de refúgio de fauna. Os autores sugerem como futuros temas para pesquisa a modelagem do formato de tais áreas de refúgio e a sua conectividade ao longo do tempo.

⁵ “Tabu Search”.

⁶ “Column Generation”.

⁷ Algoritmo para solução de problemas de programação linear com variáveis inteiras.

2.4.2 Restrições espaciais de conectividade

O problema do estabelecimento de corredores de conectividade entre habitats surge como tema principal em trabalhos de Fuller e Sarkar (2006), Hof et al. (1994), Loehle (1999), Martins et al. (1998), Önal e Briers (2005), Sessions (1992) e Williams (1998).

O objetivo das restrições espaciais de conectividade não é evitar o corte de áreas adjacentes ou restringir a área máxima a ser cortada, mas estabelecer uma conexão entre dois ou mais fragmentos de habitat natural adjacentes a floresta alvo do planejamento do manejo florestal, aumentando ou permitindo o trânsito de populações silvestres entre os fragmentos, criando uma condição necessária para o estabelecimento de uma metapopulação, com conseqüente aumento das suas chances de conservação.

A consideração de questões espaciais como o estabelecimento de corredores de conectividade ou a imposição de uma área contígua mínima de floresta madura, evitando a demasiada fragmentação do habitat, tornam o problema de modelagem do manejo florestal ainda mais complexo (MARTELL; GUNN; WEINTRAUB, 1998). Uma breve evolução os modelos e métodos utilizados na literatura para lidar com o problema de conectividade no manejo de florestas ou na implementação da conectividade em áreas fragmentadas é apresentada a seguir.

Sessions (1992) publicou uma das primeiras abordagens considerando a conectividade entre fragmentos da paisagem em modelos matemáticos para o planejamento do manejo de florestas. O autor modelou o problema de conectividade como uma rede Steiner⁸, onde parcelas críticas de florestas deveriam ser conectadas com outras parcelas consideradas elegíveis, e essas parcelas elegíveis deixariam de ser colhidas para compor o corredor. O objetivo do trabalho consistiu em conectar todas as parcelas críticas minimizando o custo de oportunidade do corredor, o qual foi estimado pela madeira não colhida das parcelas eleitas para compor o corredor de conectividade. O autor considerou o estabelecimento do corredor em apenas um período de tempo, não

⁸ O problema de rede Steiner difere do problema “the minimum spanning tree” pois não é necessário que todos os nós da rede estejam conectados.

tratando a dinâmica do manejo da floresta ao longo do tempo para o estabelecimento do corredor. Para a resolução do problema, foi implementada uma heurística para encontrar os corredores com menor custo de estabelecimento, pois o tamanho do problema inviabilizaria o uso de algoritmos exatos disponíveis, uma vez que esses não conseguiriam obter uma solução viável para o problema em um tempo considerado aceitável.

Dois anos depois, Hof et al (1994) publicaram um trabalho onde a conectividade entre os fragmentos foi considerada de forma indireta, ao modelarem o crescimento e a dispersão de uma população fictícia de duas espécies entre as parcelas da paisagem ao longo de dez anos, incorporando a dinâmica do processo do manejo florestal ao longo do tempo no modelo. Os autores utilizaram a programação linear inteira mista (PLIM) para resolver o problema, obtendo resultados considerados satisfatórios.

O problema de conectividade voltou a ser abordado de forma direta por Williams (1998), ao considerar a formação dos corredores de conectividade em paisagens hipotéticas, conectando dois ou mais fragmentos, utilizando um modelo de rede Steiner, em um problema multiobjetivo, visando selecionar corredores de conectividade que minimizassem tanto o custo de aquisição das terras para conservação como a quantidade de área inadequada para a composição do corredor dentro das terras escolhidas. Os autores utilizaram a PLIM como técnica de resolução e consideraram apenas um único período de tempo na resolução. Algo importante a salientar é que em todos os cenários considerados (em termos de pesos entre as funções objetivo), o algoritmo encontrou soluções inteiras já na resolução do problema relaxado, não sendo necessário inicializar o algoritmo “branch-and-bound”.

No Brasil, Martins et al (1998) propuseram uma metodologia para elaboração de corredores de conectividade em paisagens com fragmentos de vegetação nativa, baseando-se em mapas de uso do solo e utilizando a declividade, a altitude, a rede de drenagem, as estradas e as categorias de uso de solo para gerar um mapa de custos de conectividade. Em seguida, a ferramenta PathWay do software ArcGIS seria utilizada para encontrar o caminho mais curto a cada dois fragmentos, visando implementar o corredor de conectividade entre os fragmentos selecionados por pares de cada vez. A metodologia foi testada para a região do município de Viçosa-MG, com

resultados considerados satisfatórios, indicando a escolha dos caminhos dos corredores altamente correlacionada com a rede de drenagem, indicando que a recuperação das matas ciliares seria uma boa estratégia para a implementação dos corredores ecológicos.

Uma abordagem totalmente diferente das anteriores foi proposta por Loehle (1999) para encontrar o caminho mais curto ao conectar fragmentos isolados na paisagem. O autor desenvolveu um algoritmo que se baseia na dispersão e no reconhecimento de odores que várias espécies de animais utilizam para encontrar parceiros e se comunicar. Os odores são dispersos de forma aleatória a partir dos fragmentos remanescentes, sendo a sua concentração inversamente proporcional à distância, e aquelas áreas com maior concentração de odores são escolhidas para serem convertidas em novos fragmentos. O algoritmo apresentou-se eficiente e eficaz para estabelecer conexão entre fragmentos, alterar o formato dos fragmentos e aumentar a sua área interior. Entretanto, o algoritmo considera apenas um único período de tempo, não levando em conta a dinâmica do manejo florestal; além disso considera o custo de conectividade dado pela concentração dos odores nas células da paisagem, o que não é tão simples de ser transformado em indicadores verdadeiramente utilizados para decidir a formação dos corredores, tais como custo de aquisição das terras e qualidade ambiental dos habitats. Önal e Briers (2005) apresentaram um modelo de programação linear inteira, baseado na teoria de grafos, cujo objetivo é estabelecer uma rede de áreas protegidas que seja representativa para um conjunto de espécies, minimizando o déficit de conectividade da rede. Algo inovador nessa formulação foi a imposição de um número máximo de células da paisagem que poderiam ser utilizados para estabelecer o corredor, o que foi possível devido à um conjunto novo de restrições que permite a passagem do fluxo da rede de conectividade apenas nas áreas escolhidas pelo modelo para compor o corredor. essa restrição possibilita alterar o grafo de representação da conectividade dinamicamente durante o processo de resolução do modelo. Entretanto os autores consideraram apenas um único período de tempo na sua formulação.

Cerdeira et al. (2005) propuseram uma forma diferente de lidar com o problema, ao invés de minimizar o custo de implementar a conectividade, os autores inseriram a conectividade como parte das restrições do problema, onde as soluções viáveis são

apenas aquelas que já apresentam uma rede conectada. O objetivo do modelo era encontrar uma rede de conectividade mínima, onde cada espécie listada na paisagem fosse encontrada pelo menos uma vez dentro dos fragmentos componentes do corredor proposto. Os autores utilizaram três técnicas para resolver o problema: a primeira foi uma heurística desenvolvida pelos próprios autores, que atuava em três estágios, primeiramente selecionava um conjunto de fragmentos que incluísse todas as espécies listadas, em seguida conectava os fragmentos escolhidos, e finalmente analisava quais dos fragmentos escolhidos poderiam ser descartados mantendo a solução viável, tentando minimizar o número de fragmentos que compunham o corredor; a segunda técnica utilizada pelos autores foi o algoritmo BBA tradicional disponível no CPLEX 7.0, para isso os autores desenvolveram um modelo matemático de programação linear inteira mista onde impunham a minimização do número de fragmentos escolhidos e a restrição de que todas as espécies deveriam ser representadas, caso a solução obtida não fosse uma solução conectada, restrições adicionais são inseridas até obter uma solução conectada, que seria ótima; e a terceira foi um algoritmo para seleção de restrições que impusessem ao BBA cortes mais profundos nos ramos delineados pelo algoritmo, de modo que uma solução inteira fosse encontrada com menor esforço computacional. A heurística mostrou-se muito eficiente uma vez que, para vinte e cinco tentativas executadas, obteve cinco soluções com 23 fragmentos a serem conectados no problema em análise, enquanto a solução ótima dada pelo BBA foi de 22 fragmentos. O esforço computacional despendido pela heurística foi de 0,55 segundos, enquanto o BBA demorou 11,75 horas, das quais 5,52 horas foram gastas para provar que a melhor solução obtida era a solução ótima. O algoritmo para seleção de restrições diminuiu o esforço computacional para 10,49 horas, entretanto a solução ótima foi obtida após 2,48 horas de processamento. Os autores também consideraram apenas um período de tempo em sua análise.

Fuller e Sarkar (2006) desenvolveram um software para análise e implementação de corredores de conectividade entre áreas de conservação que apresentassem (i) a maior qualidade ambiental do corredor ou (ii) a menor área. Os autores representaram a conectividade entre os fragmentos como um grafo e utilizaram um algoritmo para encontrar as menores árvores que abrangessem todos os nós (fragmentos) para

resolver o problema. O software, intitulado LQGraph, mostrou-se capaz de lidar com problemas de conexão de áreas a serem conservadas bem maiores que os métodos tradicionalmente utilizados, além de possuir duas funções adicionais, a de determinar qual a melhor forma de isolar um fragmento da paisagem, caso os gestores estejam preocupados com os aspectos negativos da conectividade como disseminação de doenças e fogo, e a possibilidade de avaliar cenários para o adensamento do habitat de um fragmento.

A maioria dos trabalhos envolvendo a otimização do problema de conectividade estão focados em encontrar algoritmos e modelos eficientes para conectar fragmentos de uma paisagem considerando apenas um único período de tempo, não incorporando nos modelos de otimização a dinâmica temporal envolvida pelo manejo de florestas. Além disso, os trabalhos geralmente envolvem objetivos diretamente ligados a conservação da biodiversidade, como maximizar a qualidade do corredor ou implementar um corredor com o menor custo. Até o momento ainda não surgiram muitos trabalhos que mantenham os objetivos dos planos de manejo de florestas de produção, geralmente a maximização do lucro ou da produção ao longo do tempo, incorporando as questões de conectividade como restrições operacionais a serem atendidas ao longo do horizonte de planejamento.

2.5 Conclusão

A aceleração da taxa de extinção das espécies conseqüente das atividades antrópicas é uma realidade e um problema que tem sido alvo de estudos de vários pesquisadores das mais diversas áreas ao redor do mundo. Das principais causas dessa aceleração, as que mais chamam atenção são a destruição e a fragmentação do habitat natural das espécies.

Uma das formas de aumentar as taxas de possibilidade de sobrevivência das espécies é permitir o estabelecimento de metapopulações, sendo a formação de corredores de conectividade entre as áreas fragmentadas uma boa estratégia para se atingir esse objetivo.

Embora a formação de tais corredores não seja imposta pela legislação atualmente, várias empresas ligadas ao setor florestal ao redor do mundo já incorporaram, por iniciativa própria, questões ambientais no manejo de suas florestas de produção, sendo a formação ou o estudo de viabilidade de corredores de conectividade uma delas.

Os estudos relacionados à otimização da incorporação dos corredores de conectividade geralmente diferem dos problemas de planejamento do manejo das florestas de produção em dois aspectos, não incorporam a dinâmica temporal na elaboração dos corredores e visam maximizar a qualidade dos corredores ou minimizar o seu custo de implantação.

Trabalhos que incorporem a formação dos corredores de conectividade nos modelos de otimização do planejamento do manejo das florestas de produção, mantendo o objetivo de maximização de lucro ou produção e considerando vários períodos de tempo na sua análise para garantir a sustentabilidade da produção, poderiam contribuir com uma linha de pesquisa ainda não muito explorada até o momento.

Referências

AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION. Sustainable Forest Initiative Standard – Principles and Objectives. Washington: AF&PA, 2000, 7 p. Disponível em: <http://64.29.218.140/Content/NavigationMenu/Environment_and_Recycling/SFI/Publications1/2000_standard.pdf>. Acesso em: 13 mar 2006.

ARRUDA, M.B. Corredores Ecológicos do Brasil – Gestão Integrada de Ecossistemas. In: ARRUDA, M.B.; NOGUEIRA, L.F.S. **Corredores ecológicos**: uma abordagem integradora de ecossistemas no Brasil. Brasília: IBAMA, 2004. p. 11-46.

AUGUSTI, J.C.; FERRAZ, F.F.de; FERRAZ, S.F.DE; SILVA, J.F.DA; CAMARGO, S.L. Cultivo integrado com florestas naturais de baixo impacto. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v.4, p. 62-65, dez 2005.

BARRETT, T.M.; GILLESS, J.K.; DAVIS, L.S. Economic and Fragmentation Effects of Clearcut Restrictions. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n. 4, p. 569-577, 1998.

BASKENT, E.Z.; KELES, S. Spatial forest planning: a review. **Ecological modeling**, Amsterdam, v. 186, n. 2, p. 143-173, Aug 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03043800> . Acesso em: 04 mai 2007.

BEIER, P; NOSS, R.F. Do Habitat Corridors Provide Connectivity? **Conservation Biology**, Oxford, v. 12, n. 6, p. 1241-1252, Dec 1998.

BORGES, J.G.; HOGANSON, H.M. Assessing the impact of management unit design and adjacency constraints on forestwide spatial conditions and timber revenues.

Canadian Journal of Forest Research, Ottawa, v. 29, n. 11, p. 1764-1774, 1999.

BRASIL. Lei n.9985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: <

<http://www.mma.gov.br/port/sbf/dap/doc/snuc.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2006.

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

CARO, F.; CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; WEINTRAUB, A. A 2-Opt Tabu Search Procedure for the Multiperiod Forest Harvesting Problem with Adjacency, Greenup, Old Growth, and Even Flow Constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 49, n. 5, p. 738-750, Oct 2003.

CERDEIRA, J.O.; GASTON, K.J.; PINTO, L.S. Connectivity in priority area selection for conservation. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam ,v.10, n. 3, p. 183-192, Sep 2005.

CURTIS, F.H. Linear programming the management of a Forest Property. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 60, n. 9, p. 611-616, Sep 1962. Disponível em:

<http://www.ingentaconnect.com/content/saf/jof/1962/00000060/00000009/art00006>.

Acesso em: 04 nov 2007.

DAMSCHEIN, E. I.; HADDAD, N.M.; ORROCK, J.L.; TEWKSBURY, J.J.; LEVEY, D.J. Corridors Increase Plant Species Richness at Large Scales (REPORTS). **Science**, Washington – DC, v. 313, n. 5791, p. 1284 – 1286, Sep 2006.

DARIO, F.R.; ALMEIDA, A.F. Influência de corredor florestal sobre a avifauna da Mata Atlântica. **Scientia Forestalis**, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba. n. 58, p. 99-109, dez 2000. Disponível em:

<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr58/cap08.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2006.

DAVIS, L.S.; JOHNSON, K.N.; BETTIGER, P.; HOWARD, T.E. **Forest management: to sustain ecological, economic, and social values**. 4th ed. Long Grove: Waveland Press, I, 2005. 804 p .

DIXON, J. D.; OLI, M.K.; WOOTEN, M. C.; EASON, T. H.; MCCOWN, J. W.; PAETKAU. Effectiveness of Regional Corridor in Conneting two Florida Black Bear Populations. NA, **Conservation Biology**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 155-162, 2006.

FALCÃO, A.O.; BORGES, J. Combining Random and Systematic Search Heuristic Procedures for Solving Spatially Constrained Forest Management Scheduling Models. **Forest Science**, Bethesda, v. 48, n. 3, p. 608-620, Aug 2002.

FONSECA, G.A.B.; ALGER, K.; PINTO, L.P.; ARAÚJO, M.; CAVALCANTI, R. Corredores de Biodiversidade: O Corredor Central da Mata Atlântica. In: ARRUDA, M.B.; NOGUEIRA, L.F.S. **Corredores ecológicos**: uma abordagem integradora de ecossistemas no Brasil. Brasília: IBAMA, 2004. p. 47-66.

FULLER, T.; SARKAR, S. LQGraph: A software package for optimizing connectivity in conservation planning. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 21, n. 5, p. 750-755, May 2006.

GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A.T.; BARAHONA, F.; EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A. Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions: Exploring Exact Approaches. **Operations Research**, Cambridge, v. 53, n. 3, p. 490-500, May-Jun 2005.

HESS, G. R. Conservation corridors and contagious disease: a cautionary note. **Conservation Biology**, Oxford, v. 8, n. 1, p. 256-262, May 1994.

HOF, J.G.; BEVERS, M.; JOYCE, L.; KENT, B. An Integer Programming Approach for Spatially and Temporally Optimizing Wildlife Populations. **Forest Science**, Bethesda, v. 40, n. 1, p. 177-191, Feb 1994.

HOGANSON, H.M.; BORGES, J.G. Using Dynamic Programming and Overlapping Subproblems to Address Adjacency in Large Harvest Scheduling Problems. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n. 4, p. 526-538, Nov 1998.

HORSKINS, K.; MATHER, P.B.; WILSON, J.C. Corridors and connectivity: when use and function do not equate. **Landscape Ecology**, AZ Dordrecht, v. 21, n. 5, jul 2006. Disponível em:

<<http://www.springerlink.com.w10077.dotlib.com.br/content/84qq533865702442/fulltext.pdf>>. Acesso em: 20 nov 2006.

JORDÁN, F. A reliability-theory approach to corridor design. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 128, n. 2-3, p. 211-220, abr 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/03043800>>. Acesso em: 15 out 2005.

LOCKWOOD, C.; MOORE, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, n. 3, p. 468-478, Mar 1993.

LOEHLE, C. Optimizing wildlife habitat mitigation with a habitat defragmentation algorithm. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.120, p. 245-251, 1999.

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

MARTINS, A.K.E.; SARTORI NETO, A.; MARTINS, I.C. de M.; BRITES, R.S.; SOARES, V.P. Uso de um sistema de informações geográficas para indicação de corredores ecológicos no município de Viçosa-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v.22, n.3, p.373-380, mai/jun 1998.

McDILL, M.E.; BRAZE, J. Comparing Adjacency Constraint Formulations for Randomly Generated Forest Planning Problems with Four Age-Class Distributions. **Forest Science**, Bethesda, v. 46, n. 3, p. 423-436, Aug 2000.

McDILL, M.E.; BRAZE, J. Using the Branch and Bound Algorithm to Solve Forest Planning Problems with Adjacency Constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, n. 3, p. 403-418, Aug 2001.

McDILL, M.E.; REBAIN, S.A.; BRAZE, J. Harvest Scheduling with Area-Based Adjacency Constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 48, n. 4, p. 631-642, Nov 2002.

MENEGHIN, B.J.; KIRBY, M.W.; JONES, J.G. An algorithm for writing adjacency constraints efficiently in linear programming models. In: SYMPOSIUM ON SYSTEMS ANALYSIS IN FOREST RESOURCES, 1988, California. Papers... California: USDA Forest Service, 1988. p. 46-53. (USDA Forest Service – General Technical Report RM-161.)

MEYER, W. B.; TURNER II, B. L. **Changes in land use and land cover: a global perspective**. New York: Cambridge University Press, 1994. 537p.

MURRAY, A.T. Spatial restrictions in harvest scheduling. **Forest Science**, Bethesda, v. 45, n. 1, p. 45-52, Feb 1999.

NASI, R.; KOPONEN, P.; POULSEN, J.G.; BUITENZORGY, M.; RUSMANTORO, W. Impact of landscape and corridor design on primates in a large-scale industrial tropical plantation landscape. **Biodiversity and Conservation**, Amsterdam, 2007. Disponível em: <http://www.springerlink.com.w10077.dotlib.com.br/content/f3515k1x57336655/?p=b4bac357b34044d3a53fa2e5194226c7&pi=0> >. Acesso em: 20 nov 2007.

ÖHMAN, K. Creating continuous areas of old forest in long-term forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 11, p. 1817-1823, Nov 2000.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L.O. The core area concept in forming contiguous areas for long-term forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 28, n. 7, p. 1032-1039, Jul 1998.

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**, Amsterdam, v. 161, n. 1/3, p. 221-230, May 2002.

ÖNAL, H.; BRIERS, R.A. Designing a conservation reserve network with minimal fragmentation: A linear integer programming approach. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v. 10, n. 3, Sep 2005. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/k1q2527g368u043g/fulltext.pdf>>. Acesso em: 16 de sep 2006.

PRIMACK, R.B.; RODRIGUES, E. **Biologia da conservação**. Londrina: E. Rodrigues, 2001. 328p.

REBAIN, S.; McDILL, M.E. A mixed-integer formulation of the minimum patch size problem. **Forest Science**, Bethesda, v. 49, n. 4, p. 608-618, Aug 2003.

RICH, A.C.; DOBKIN, D.S.; NILES, L.J. Defining forest fragmentation by corridor width: the influence of narrow forest-dividing corridors on forest-nesting birds in southern New Jersey. **Conservation Biology**, Oxford, v. 8, n. 4, p. 1109-1121, Dec 1994.

SESSIONS, J. Solving for habitat connections as a steiner network problem. **Forest Science**, Bethesda, v. 38, n. 1, p.203-207, Feb 1992.

SHAFFER, M.L. Minimum population sizes for species conservation. **BioScience**, Washington, DC, v. 31, n. 2, p. 131-134, Feb 1981.

SIMBERLOFF, D.; COX, J. Consequences and costs of conservation corridors. **Conservation Biology**, Oxford, v. 1, n. 1, p. 63-71, May. 1987. Disponível em: <http://www.blackwell-synergy.com/doi/pdf/10.1111/j.1523-1739.1987.tb00010.x>. Acesso em: 20 mar 2007.

SUSTAINABLE FORESTRY INITIATIVE: 2005 – 2009 Standard. Sustainable Forestry Board (SFB) and American Forest & Paper Association (AF&PA), 2005. 27 p. Disponível em: <<http://www.aboutsfb.org/generalPDFs/SFBStandard2005-2009.pdf>>. Acesso em: 15 nov 2006.

THOMPSON, E.F.; HALTERMAN, B.G.; LYON, T.J.; MILLER, R.L. Integrating timber and wildlife management planning. **The Forestry Chronicle**, Ottawa, v. 49, n. 6, p. 247-250, Dec 1973.

WEINTRAUB, A.; BAHARONA, F.; EPSTEIN, R. A Column Generation Algorithm for Solving General Forest Planning Problems with Adjacency Constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 40, n. 1, p. 142-161, Feb 1994.

WEINTRAUB, A. MURRAY, A.T. Review of combinatorial problems induced by spatial forest harvesting planning. **Discrete Applied Mathematics**, Amsterdam, v. 154, n.5, p. 867-879, Apr 2006.

WILLIAMS, J.C. Delineating protected wildlife corridors with multi-objective programming. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v. 3, n. 1/2, p. 77-86, Mar 1998.

3 A INCORPORAÇÃO DE CORREDORES DE CONECTIVIDADE EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DE FLORESTAS INDUSTRIAIS: uma abordagem de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

Resumo

A incorporação de questões espaciais ambientais em problemas de otimização do manejo de florestas de produção tem se constituído um desafio para os cientistas da área de pesquisa operacional, especialmente devido a natureza combinatorial que esses modelos apresentam. Um desses problemas envolve a necessidade de se conectarem fragmentos de vegetação nativa e o manejo da paisagem que cerca esses fragmentos. O presente trabalho visa desenvolver um modelo de programação linear inteira mista que, além de maximizar o lucro ou a produção advinda do manejo florestal e controlar as suas restrições financeiras e operacionais, garanta que uma conectividade mínima seja estabelecida entre os fragmentos florestais naturais adjacentes ao plantio florestal a cada ano do horizonte de planejamento, utilizando talhões com características pré-definidas para comporem os corredores de conectividade. A conectividade entre fragmentos foi incorporada como uma rede Steiner em um modelo de planejamento florestal do Tipo I, segundo a denominação consagrada por Nobre e Rodriguez (2005), com pisos e tetos anuais de produção e utiliza-se de uma importante propriedade da programação de redes. Essa propriedade permite que as variáveis que representam os corredores sejam definidas como contínuas apesar de resultarem inteiras na solução ótima. O modelo desenvolvido foi testado em dois estudos de caso, numa fazenda de uma empresa de celulose no estado de São Paulo e no Parque Estadual Anhanguera. A solução ótima foi encontrada para ambos os casos, depois de um minuto e sete segundos no primeiro caso e trinta minutos e quarenta e um segundos no segundo. O modelo permitiu também estimar o custo de estabelecimento da conectividade pela diferença entre os valores da função objetivo dos modelos com e sem as restrições de conectividade, sendo este de 0,051% do valor total do projeto sem conectividade para a fazenda da empresa de celulose. A configuração do grafo desejado e as condições impostas para que um talhão possa fazer parte do corredor de conectividade em um determinado período de tempo, além da distribuição das áreas dos plantios em diferentes classes de idade e do elevado número de regimes de manejo para as unidades de manejo são algumas das prováveis causas da eficiência computacional do modelo matemático para resolução do problema.

Palavras chave: Corredores ecológicos; Programação linear inteira mista; Restrições espaciais; Manejo florestal; Economia florestal

Abstract

Spatial environmental constraints in forest management optimization problems have become a challenge to researchers working with optimized forest management planning models, specially because the combinatorial nature that these problems

present. One of these problems deals with the need for connecting native forest fragments through the management of the landscape that surrounds them. The objective of this paper is to develop a mixed integer linear programming model that guaranties a minimal connectivity among fragmented natural areas while maximizing the profit or the production of the managed industrial forests. The corridors are formed by industrial forest stands that presenting certain characteristics defined by the forest manager. The connectivity among fragments was inserted as a Steiner net in a Type I harvest scheduling model, as defined by Nobre and Rodriguez (2005), constrained by a minimum and maximum annual production range, and uses an important property of network models. This property intrinsically turns the connectivity network variables integers, although defined as non-integer variables. The formulation was tested in two study cases; a pulpwood farm in the state of Sao Paulo, and in the Anhanguera Forest State Park. An optimal solution was found to both cases after one minute and seven seconds for the first case, and after thirty minutes and forty one seconds for the second case. The opportunity cost for creating the corridors can be valued by the difference observed for the values of the objective functions of the models with and without connectivity. For the pulpwood farm example it resulted equal to 0.051% of the objective function value obtained by the mixed integer linear programming model without connectivity. The graph configuration and the necessary conditions for a forest stand to be chosen as part of the corridor, besides the well distributed area of the forest in the age classes, and the high number of different management regimes applied to each stand are some of the probable causes of the high computational efficiency of the model to solve the problem.

Keywords: Ecological corridors; Mixed integer linear programming; Spatial restrictions; Forest management; Forest economics

3.1 Introdução

Atualmente, a sociedade como um todo se preocupa com o uso racional e sustentável dos recursos naturais. O setor produtivo tem buscado parcerias com entidades governamentais e não-governamentais para tornar os processos produtivos mais eficientes do ponto de vista do uso de recursos naturais e na emissão de poluentes.

Um importante componente desses recursos naturais são as florestas, uma vez que constituem o habitat de diversas populações silvestres e proporcionam uma gama de bens e serviços aos seres humanos.

Com o objetivo de garantir o uso racional dos recursos naturais e florestais, os países têm elaborado e aprovado leis e regulamentos ambientais. Entretanto, muitas empresas florestais têm buscado incorporar no manejo de suas florestas processos que cumpram

metas de conservação superiores às aquelas impostas pelas leis e normas governamentais.

Estabelecer práticas de um manejo florestal sustentável regido por normas não governamentais, por iniciativa das próprias empresas e cujos esforços para conservação da biodiversidade e dos ativos florestais devem ser superiores àqueles determinados pelos governos, já são uma realidade na América do Norte (SUSTAINABLE FORESTRY INITIATIVE, 2005).

No Brasil, a companhia Suzano de Papel e Celulose, em parceria com a Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz (Esalq/USP), já participou de pelo menos dois projetos de pesquisa buscando considerar questões ambientais no manejo de suas florestas de produção. O primeiro foi publicado por Dario e Almeida (2000), sobre a influência de corredores de conectividade de Mata Atlântica adjacentes aos plantios de eucalipto das empresas na dispersão da avifauna da região; o segundo avaliou a redução de impactos ambientais resultante do manejo integrado das florestas de eucalipto com as florestas nativas do seu entorno (AUGUSTI et al., 2005).

O estabelecimento de corredores de conectividade surge como uma importante estratégia para a conservação da biodiversidade em áreas que sofreram fragmentação do seu habitat (PRIMACK; RODRIGUEZ, 2001), especialmente por criar as condições necessárias para que populações de fragmentos florestais isolados possam interagir, diminuindo a probabilidade de extinção dessa população devido a fatores como a perda de variabilidade genética, flutuações demográficas resultantes de alterações nas taxas de natalidade e mortalidade, flutuações ambientais decorrentes de variações na competição, disponibilidade de alimentos, ocorrência de doenças e ação predatória, além de catástrofes naturais como enchentes e incêndios.

Embora os corredores de conectividade possam trazer eventuais malefícios como a propagação de catástrofes naturais, doenças contagiosas e espécies exóticas (SIMBERLOFF; COX, 1992), ou não exercerem a sua função de interação entre as diferentes populações, mesmo quando utilizados como corredores de passagem pelas espécies, devido às características comportamentais das espécies (HORSKINS; MATHER; WILSON, 2006), os estudos ligados ao tema encontraram maiores

evidências dos efeitos benéficos dos corredores de conectividade do que seus efeitos maléficos (BEIER; NOSS, 1998; DAMSCHEN et al., 2006).

Entretanto, ao se planejar um corredor de conectividade, é necessário estabelecer quais são as espécies alvo desse corredor, e quais poderiam ser prejudicadas por ele, uma vez que não existem corredores de conectividade universais (JORDAN, 2000), e os corredores estabelecidos podem servir de passagem para algumas espécies e de obstáculo para outras.

A seleção de áreas para composição dos corredores ecológicos mais eficientes e/ou de menor custo resulta em um problema de muitas variáveis e de difícil solução. A elaboração de modelos matemáticos, algoritmos e heurísticas capazes de resolver esse problema têm constituído um desafio para os pesquisadores da área do planejamento florestal otimizado nas últimas duas décadas.

O estabelecimento de corredores de conectividade em um único período, ao longo de uma paisagem, tem se constituído no foco da maioria dos estudos relacionados ao tema.

O trabalho de Sessions (1992) foi um dos pioneiros na área, ao tratar a questão do estabelecimento dos corredores em florestas manejadas nos Estados Unidos. A rede de conectividade entre fragmentos foi estabelecida como uma rede Steiner⁹, com o objetivo de minimizar o custo de oportunidade da madeira não colhida nas áreas estabelecidas para formação dos corredores naquele período, sendo resolvida por uma heurística desenvolvida pelo autor. Essa mesma estratégia para incorporação dos corredores foi utilizada por Williams (1998), em um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) multiobjetivo, visando minimizar o custo de aquisição das terras que irão compor o corredor e a quantidade de área inadequada dentro das terras escolhidas.

Önal e Briers (2005) representaram os corredores de conectividade em um problema de PLIM, utilizando a teoria de grafos, visando delinear uma reserva com fragmentação mínima onde os fragmentos a serem conectados deveriam abrigar todas as espécies presentes na paisagem, o gestor determina a regra para inclusão do número de

⁹ O problema de rede Steiner difere do problema “the minimum spanning tree” pois não é necessário que todos os nós da rede estejam conectados.

espaços da paisagem que deverão ser incluídos na reserva que representam cada espécie, e o modelo escolherá aqueles que resultarão na reserva com a menor falha de conexão. Os autores incorporaram um conjunto de restrições que possibilita ao modelo estabelecer o fluxo de conexão apenas nos fragmentos da paisagem que foram escolhidos para compor a base do problema, dinamizando o possível grafo para o estabelecimento da reserva.

Cerdeira; Gaston e Pinto (2005) utilizaram três técnicas para solucionar o problema do estabelecimento de reservas de conservação de tamanho mínimo, que representassem todas as espécies de fauna presentes na paisagem. A primeira técnica consistiu em uma heurística em três estágios, que resultou em soluções viáveis de boa qualidade com um esforço computacional mínimo; a segunda técnica utilizou um modelo de PLIM para representar o problema; e a terceira incorporou um algoritmo para elaborar restrições de forma eficiente, visando reduzir o esforço computacional do algoritmo branch-and-bound. O tempo para que a segunda e terceira técnicas provassem ter encontrado a solução ótima foi semelhante (11,75h e 10,48h, respectivamente), entretanto a terceira técnica encontrou a solução ótima em menos da metade do tempo da segunda (2,56h e 6,23h).

Os trabalhos anteriormente citados evoluíram os modelos e as técnicas para resolver o problema de conectividade em paisagens florestais, mas consideraram apenas um período de tempo, deixando de incorporar a dinâmica necessária para representar o manejo florestal.

Essa dinâmica foi incorporada no estudo de Hof et al. (1994), ao tratar da conectividade entre talhões florestais de forma indireta, modelando o padrão de crescimento e dispersão das espécies, em um modelo de PLIM multiperiférico. Os autores testaram o modelo considerando três funções objetivo, todas envolvendo a otimização de parâmetros ambientais.

Os trabalhos encontrados na literatura geralmente tratam a questão da incorporação dos corredores de conectividade no planejamento do manejo florestal sob um ponto de vista de conservação da biodiversidade e/ou com um único horizonte de tempo. Poucos trabalhos trataram da incorporação dos corredores mantendo o objetivo tradicional de maximizar o lucro ou a produção do manejo florestal (SESSIONS, 1992), ou

incorporaram a dinâmica multitemporal implícita ao planejamento do manejo florestal (HOF et al., 1994).

Dessa forma, o desenvolvimento de um modelo que incorporasse a formação dos corredores de conectividade como parte das restrições do planejamento do manejo florestal, considerando a sua dinâmica multitemporal e mantendo os objetivos tradicionais de maximizar o lucro ou a produção, torna-se necessário para se adaptar a realidade brasileira, onde predominam as florestas de produção resultantes de plantios adjacentes a fragmentos de vegetação nativa. Além disso, uma formulação desse tipo poderia contribuir com uma forma de representar o problema ainda pouco explorada na literatura internacional.

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo matemático de otimização, que incorpore a necessidade de formação de corredores de conectividade entre fragmentos de vegetação nativa adjacentes às florestas de produção, considerando o aspecto da dinâmica multitemporal e da maximização do lucro ou produção inerentes ao planejamento do manejo de florestas de produção.

Para representação do modelo proposto, dois estudos de caso reais serão apresentados, um tratando do manejo de um plantio de eucalipto para abastecimento de uma indústria de celulose e outro visando a conversão de uma área ocupada por plantios de eucalipto para vegetação nativa.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Desenvolvimento do Modelo Matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM)

Como os modelos envolvendo restrições espaciais preconizam o uso de variáveis inteiras, optou-se pela elaboração de um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) para a resolução do problema proposto. As vantagens de tais modelos são: a fácil implementação e a resolução potencial em softwares comerciais de otimização; a garantia de se obter uma solução ótima, uma vez que estes utilizam o algoritmo “Brach and Bound” (BBA) e o algoritmo “Cutting Plane”; além de ser um método bastante

conhecido e utilizado em inúmeras aplicações na área de pesquisa operacional, facilitando a divulgação do conhecimento (MCDILL; BRAZE, 2000). Uma descrição detalhada do funcionamento dos algoritmos mencionados acima pode ser encontrada em Winston (2004)

O objetivo de se incluir as restrições espaciais no modelo básico de otimização do manejo florestal foi alcançado com o modelo de programação linear inteira mista apresentado abaixo:

$$\text{Função Objetivo)} \quad \text{Max } Z = \sum_{i=1}^n A_i \sum_{j=1}^m D_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

Sujeito a

$$\text{Exclusividade)} \quad \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1 \text{ para todo } i \quad (2.2)$$

$$\text{EndProdução)} \quad \sum_{i=1}^n A_i \sum_{j=1}^m v_{ijpt} x_{ij} = vprod_{pt} \text{ para todo } p \text{ e } t \quad (2.3)$$

$$\text{PisoProdução)} \quad vprod_{pt} \geq vmin_{pt} \text{ para todo } p \text{ e } t \quad (2.4)$$

$$\text{TetoProdução)} \quad vprod_{pt} \leq vmax_{pt} \text{ para todo } p \text{ e } t \quad (2.5)$$

$$\text{EndReforma)} \quad \sum_{i=1}^n A_i \sum_{j=1}^m ref_{ijt} x_{ij} = AreaRef_t \text{ para todo } t \quad (2.6)$$

$$\text{EndOrçamento)} \quad \sum_{i=1}^n A_i \sum_{j=1}^m orc_{ijt} x_{ij} = ContOrc_t \text{ para todo } t \quad (2.7)$$

$$\text{ExistênciaNó)} \quad \sum_{j=1}^m b_{ijt} x_{ij} \geq no_{it} \text{ para todo } i \text{ e } t \quad (2.8)$$

$$\text{ExistênciaArco)} \quad \sum_{e \in E_i} arco_{eit} + \sum_{s \in S_i} arco_{ist} \leq 2(nf - 1)no_{it} \text{ para todo } i \text{ e } t \quad (2.9)$$

$$\text{Fluxo)} \quad \sum_{e \in E_i} arco_{eit} - \sum_{s \in S_i} arco_{ist} = fl_i \text{ para todo } i \text{ e } t \quad (2.10)$$

$$x_{ij} = \{0,1\}, \quad no_{it} \geq 0, \quad 0 \leq arco_{eit} \leq (nf - 1), \quad 0 \leq arco_{ist} \leq (nf - 1), \quad fl_i = \{-1,0,1\}.$$

Onde:

i - Unidades de manejo, incluindo também os fragmentos os quais se deseja conectar;

j - Regimes de manejo;

t - Período do horizonte de planejamento;

E_i - Conjunto dos arcos que entram na Unidade de Manejo i ;

S_i - Conjunto dos arcos que saem da Unidade de Manejo i ;

Z - Valor da função objetivo;

A_i - Área da Unidade de Manejo i ;

D_{ij} - Contribuição para a função objetivo caso a Unidade de Manejo i seja associada ao Regime de Manejo j ;

x_{ij} - Variável binária que assume valor 1 se o Regime de Manejo j for associado a Unidade de Manejo i , e 0 caso contrário;

v_{ijt} - Produção de madeira da Unidade de Manejo i no período t quando associada ao Regime de Manejo j ;

$vprod_{pt}$ - Variável endógena utilizada para contabilizar o volume do produto p no período t ;

$vmin_{pt}$ - Volume mínimo do produto p a ser colhido no período t ;

$vmax_{pt}$ - Volume máximo do produto p a ser colhido no período t ;

ref_{ijt} - Coeficiente binário que assume valor 1 caso a Unidade de Manejo i , quando associada ao Regime de manejo j , realiza um corte seguido de reforma no período t , e 0 caso contrário;

$AreaRef_t$ - Variável endógena utilizada para contabilizar a área total reformada em cada período t ;

orc_{ijt} - Quantidade de recursos financeiros necessários por hectare no período t , para que se possa associar o Regime de Manejo j à Unidade de Manejo i ;

$ContOrc_t$ - Variável endógena utilizada para contabilizar a quantidade total de recursos financeiros utilizada cada período t ;

b_{ijt} - Coeficiente binário que assume valor 1 caso a Unidade de Manejo i , quando associada ao Regime de Manejo j , esteja apta a formar o corredor de conectividade no período t , e 0 caso contrário;

no_{it} - Variável contínua que assume valores positivos caso o nó representado pela Unidade de Manejo i tenha sido escolhido para fazer parte do corredor no período t ;

$arco_{eit}$ - Variável contínua que assume valores positivos caso a Unidade de Manejo onde o fluxo se origina e a Unidade de Manejo i (onde ele termina) tenham sido escolhidas para fazer parte do corredor;

$arco_{ist}$ - Variável contínua que assume valores positivos caso a Unidade de Manejo i (onde o fluxo se origina) e a Unidade de Manejo onde ele termina tenham sido escolhidas para fazer parte do corredor;

nf - número de fragmentos a serem conectados;

fl_i - Coeficiente que representa o fluxo líquido em cada nó da rede, assume valor 1 caso seja um nó de origem, -1 se for um nó de destino e 0 se for um nó de passagem.

A equação 2.1 representa a função objetivo que se deseja maximizar, em geral o valor presente líquido global do projeto florestal. A equação 2.2 impõe que um único regime de manejo seja associado a cada unidade de manejo. A equação 2.3 contabiliza a produção periódica dos produtos envolvidos no manejo das florestas. As equações 2.4 e 2.5 determinam a produção mínima e máxima a serem obtidas de cada produto p , em cada período do horizonte de planejamento. A quantidade de área a ser reformada a cada período é contabilizada pela equação 2.6, e a equação 2.7 contabiliza o total de recursos financeiros dispendidos periodicamente no manejo da floresta. Estas sete primeiras equações representam o problema básico de otimização do Modelo Tipo 1 para o manejo de florestas com variáveis binárias apresentado por Nobre e Rodriguez (2005).

A consideração da implementação de conectividade é realizada pelas equações 2.8 a 2.10. A equação 2.8 determina quais são os regimes de manejo que, quando associados à unidade de manejo i , habilitam esta unidade de manejo a ser considerada para formar o corredor no período t . Uma restrição semelhante foi utilizada

por Önal e Briers (2005) para determinar quais unidades espaciais da paisagem estariam compondo o corredor proposto pelos autores. Atenção deve ser dada ao fato que esta equação é altamente generalista, permitindo que o gestor escolha os critérios que habilitarão o talhão a fazer parte do corredor em um determinado período de tempo. Neste trabalho a idade da floresta e a área do talhão foram utilizadas como critério, mas outros, como formato, declividade, tipo de solo, material genético, e densidade, poderiam ter sido utilizados. Obviamente quanto mais restrita for a condição para que o talhão possa fazer parte do corredor em um determinado período de tempo mais difícil será para o modelo encontrar uma solução, e maior será a diferença entre os valores da função objetivo dos modelos com e sem incorporação da conectividade.

A equação 2.9 condiciona a passagem de fluxos por uma determinada unidade de manejo apenas se o nó que a representa existir neste período, ou seja, esta equação é que impede que unidades de manejo associadas a prescrições que não a habilitam para fazer parte do corredor em um determinado período sejam escolhidas. O modelo foi desenvolvido de modo a conectar qualquer número de fragmentos existentes, mas partindo da premissa de que um fragmento servira de fonte e os outros de destino. Essa premissa não é essencial para a formulação do modelo, mas foi adotada visando possibilitar o uso de uma mesma Unidade de Manejo para compor corredores entre mais de dois fragmentos. Essa imposição foi obtida configurando o limite superior dos arcos igual ao número de fragmentos a serem conectados menos 1. A equação 2.10 determina o fluxo líquido nos nós da rede, ela é que constrói o corredor em cada período de tempo entre os fragmentos considerados.

A formulação proposta faz uso de uma importante propriedade da programação em redes, ressaltada por Hillier e Lieberman (2005), que se em uma rede as quantidades de origem, de destino, e a capacidade dos arcos forem números inteiros, a solução necessariamente será inteira, mesmo que as variáveis que representam os fluxos em cada arco sejam definidas como variáveis contínuas. Tal propriedade evita o aumento de variáveis inteiras do modelo, além daquelas presentes no problema básico de otimização do manejo de florestas sem considerar as restrições de conectividade.

O modelo proposto não permite que o gestor controle a qualidade do corredor como um todo em cada período de tempo, pois isto alteraria a sua estrutura matemática e não

seria possível fazer uso da propriedade de soluções inteiras da programação em redes. Entretanto, permite que o gestor tenha um controle muito preciso sobre quais talhões estarão aptos a fazer parte do corredor (pelo uso do parâmetro b_{ijt}) e quais caminhos poderão ser considerados para a formação do corredor, possibilitando um controle indireto da qualidade do corredor por meio do controle de seus componentes. Sessions (1992) afirma que a escolha dos caminhos pode ser feita ao se determinar a composição da rede, possibilitando ao gestor a inserção de um caminho (arco) entre dois talhões apenas se a adjacência entre os mesmos atender a determinados critérios, como, por exemplo, uma extensão mínima da borda entre os dois talhões.

Vale ainda salientar que o modelo proposto trata da otimização do uso da paisagem ao longo do tempo, podendo ser aplicado a qualquer problema onde alternativas diferentes e interligadas temporalmente possam ser escolhidas para cada unidade espacial da paisagem e se deseje manter algumas de suas unidades, previamente fixadas, conectadas ao longo do tempo através de outras unidades com determinadas características.

3.2.2 Estudos de caso

3.2.2.1 Fazenda Empresarial

O primeiro estudo de caso considerado é composto por uma fazenda pertencente a uma empresa de celulose e papel do estado de São Paulo, a qual será chamada de Fazenda Empresarial. A fazenda possui 6.262 hectares, sendo 1.571 ha ocupados com vegetação nativa, 4.419 ha com plantios de eucalipto e 272 ha ocupados com áreas de outros usos. A distribuição da área por classes de idade e por rotação atual dos plantios de eucalipto podem ser observadas na Figura 2.1(a), a Figura 2.1(b) apresenta a curva média de produção esperada, de madeira de celulose e energia, dos talhões da fazenda em primeira e segunda rotação.

Figura 2.1 – Distribuição de área por idades (a) e Curva de prognose de produção (b) para a Fazenda Empresarial

O mapa da Fazenda Empresarial, com a localização das Unidades de Manejo, dos fragmentos de floresta nativa e das áreas de outros usos, bem como os caminhos utilizados para a formação dos possíveis corredores, pode ser observado na Figura 2.2. Os regimes de manejo foram elaborados a partir de uma macro programada em uma planilha Excel cujo objetivo é a geração das matrizes dos coeficientes necessários ao modelo de programação linear para a otimização do problema de manejo florestal sob o regime de talhadia. A macro gera os regimes com até três rotações por ciclo de produção, com alternância entre ciclos dentro de um mesmo regime, resultando em um aumento exponencial do número de regimes de manejo com o aumento do horizonte de planejamento.

Figura 2.2 – Mapa da Fazenda Empresarial

Foram considerados dois produtos no modelo matemático, madeira para celulose e madeira para energia, o custo de oportunidade do capital foi de 10% ao ano (a.a.), o preço da madeira de eucalipto em pé foi extraído do Informativo CEPEA – Setor Florestal (2006), igual a R\$ 39,00/st em pé, fator de empilhamento de 0,7 m³/st, resultando em um preço de R\$ 55,71/ m³, as idades mínima e máxima para o corte da floresta foram de 6 e 9 anos, respectivamente, o horizonte de planejamento foi de 18 anos, a produção mínima anual de madeira para celulose considerada foi de 180.000 m³ e a máxima foi de 250.000 m³, não foram impostas restrições para a produção de madeira para energia, de área a ser reformada e do total de recursos financeiros utilizados; foram considerados ciclos com uma e duas rotações. A macro gerou 143 regimes de manejo para cada unidade de manejo, em média, totalizando 13.008 variáveis binárias atreladas a produção e 4 variáveis binárias para incorporação dos fragmentos de vegetação nativa no modelo.

O Fragmento 1 foi escolhido como unidade de origem para a formação do corredor ($f_{l_i} = -3$), devido a sua localização mais centralizada, os demais fragmentos foram designados como unidades de destino ($f_{l_i} = 1$), as unidades de manejo são definidas como unidades de passagem ($f_{l_i} = 0$). Em acordo com os técnicos da empresa, decidiu-se por considerar a idade do plantio como a característica que permitirá as Unidades de Manejo serem escolhidas para compor o corredor em um determinado período, sendo estipulado uma idade mínima de 3 anos, inclusive.

Visando avaliar o impacto da incorporação das restrições de conectividade no plano de manejo florestal da sugerido pelo modelo, tanto em termos de valor da função objetivo como do fluxo de produção de madeira a cada período, a otimização do planejamento florestal será realizada com e sem as equações 2.8 a 2.10.

3.2.2.2 Parque Estadual Anhangüera

A área do Parque Estadual Anhangüera foi utilizada para implementação do segundo estudo de caso. O Parque se situa no extremo noroeste da cidade de São Paulo, na Av. Fortunatta Tadielo Natucci 1000 (km 24,5 Via Anhangüera), coordenadas geográficas 23°25'06,5" S e 46°46'56,6" W, entre as Rodovias Anhangüera e Bandeirantes. É o maior parque urbano da cidade de São Paulo, contando com 950 ha de área total, sendo 801,52 utilizados com plantios de eucalipto com mais de 60 anos, dos quais 677,91 ha foram considerados como unidades de manejo. O Parque apresenta quatro fragmentos de vegetação nativa, de importância estratégica para o abrigo e a conservação da fauna, devendo permanecer conectados.

O objetivo principal dos gestores do Parque foi regenerar a floresta nativa da área, suprimindo as matas de eucalipto. Entretanto, essa substituição deveria atender a algumas restrições, como o aproveitamento econômico da madeira, uma produção relativamente constante ao longo do período de corte dos eucaliptos, e a manutenção da conectividade entre os fragmentos. Os corredores deveriam ser estabelecidos com unidades de manejo contendo a floresta de eucaliptos ou as áreas regeneradas com pelo menos cinco anos de idade (quatro anos após o seu corte e regeneração).

Os regimes de manejo utilizados previam apenas um corte, seguido da recuperação da unidade de manejo com vegetação nativa, e se diferenciavam apenas pelo ano em que o corte foi realizado, variando de 1 a 15 anos (a duração do horizonte de planejamento). Considerou-se que o volume de madeira colhido não diferiu entre os regimes de manejo de uma mesma unidade de manejo, pois havia dados de apenas um inventário, o do ano corrente. Tal pressuposto foi considerado viável uma vez que um plantio de eucalipto com mais de 60 anos de idade já atingiu a assíntota da sua curva de crescimento, não influenciando mais o seu volume caso o corte fosse realizado em anos posteriores.

A função objetivo utilizada diferiu um pouco da equação (2.1), pois visava a maximização da produção e não do valor total do projeto. Também foram utilizadas as equações (2.2) a (2.5) e (2.8) a (2.10) como restrições do problema. Os limites de produção foram impostos em um mínimo de 20.000 m³ de madeira por ano e um máximo de 30.000 m³. Esse problema apresenta uma interessante característica, como o objetivo é maximizar a produção de madeira, e o total produzido por talhão não varia entre os diferentes regimes de manejo, o valor da função objetivo será sempre o mesmo, independente dos regimes de manejo escolhidos, de modo que qualquer solução viável também será uma solução ótima.

Para estabelecer o desenho proposto para as unidades de manejo, se incorporou ao mapa da área uma colméia de hexágonos com áreas individuais de aproximadamente 10 ha, depois as áreas que não possuíam plantios foram removidas do mapa, e os hexágonos remanescentes foram agrupados visando obter unidades de manejo de aproximadamente 10 ha.

A Figura 2.3 apresenta o mapa do Parque Anhanguera após a definição das unidades de manejo para compor os corredores de conectividade. Para o estabelecimento da conectividade, designou-se o Fragmento 1 como o destino final do fluxo dos três corredores a serem implementados ($f_{l_i} = -3$), e os demais Fragmentos como origem ($f_{l_i} = 1$). As unidades de manejo entram no modelo como nós de passagem do fluxo do corredor ($f_{l_i} = 0$).

Figura 2.3 – Mapa do Parque Estadual Anhanguera

3.2.3 Materiais utilizados

O modelo, para os dois estudos de caso, foi processado em um microcomputador com processador Pentium D 3,4 Ghz, com 4 Gb¹⁰ de memória RAM. O software General Algebraic Modelling System (GAMS) versão 22.0, com o solver CPLEX versão 10.0.1, foi utilizado para construir as equações e resolver o modelo. Os mapas foram configurados com o auxílio do software ArcGIS 9.1, possibilitando a visualização dos resultados espaciais obtidos.

¹⁰ A quantidade máxima de memória disponibilizada pelo sistema operacional para o solver foi de 2Gb.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Fazenda Empresarial

Os dois modelos, com e sem conectividade, foram resolvidos com sucesso. Na Tabela 2.1 é possível observar algumas diferenças entre os modelos de planejamento florestal com e sem conectividade.

Tabela 2.1 – Resumo de algumas características dos modelos da Fazenda Empresarial

Característica	Com Conectividade	Sem Conectividade
Número de linhas	5.352	240
Número de colunas	20.825	13.085
Número de Variáveis Binárias	13.012	13.012
Tempo de resolução	1 min 7 seg*	30,3 seg*
Máxima memória ocupada pela árvore do BBA	2,82 MB	NA**
***Valor da função objetivo	R\$ 99.880.182,61	R\$ 99.930.660,99

* Esse foi o tempo necessário para todo o processamento do GAMS, incluindo a leitura dos dados, construção do modelo, resolução do modelo pelo CPLEX, e envio dos resultados para um arquivo MS-Excel. **O CPLEX resolveu o problema antes de emitir qualquer relatório sobre a quantidade de memória utilizada pelo algoritmo. ***A estratégia de ramificação utilizada pelo Branch-and-Bound foi ramificar o nó com o melhor valor da função objetivo.

O número de linhas (equações) e colunas (variáveis) do modelo aumenta consideravelmente quando incorporamos as restrições de conectividade. Isso já era esperado, pois são necessárias três equações para cada ano do horizonte de planejamento de forma a representar os possíveis caminhos percorridos pelos talhões; uma para avaliar se o talhão pode ser utilizado como corredor em um determinado período, outra habilitá-lo a compor o corredor caso possa ser utilizado, e uma terceira para compor o corredor. Além disso, cada caminho entre dois talhões adjacentes em cada período do horizonte de planejamento representa uma variável a ser adicionada

no modelo, bem como as variáveis que habilitam o talhão a fazer parte do corredor em determinado período do horizonte de planejamento.

Uma das vantagens da formulação proposta pode ser observada na quarta linha da Tabela 2.1, pois o número de variáveis definidas como binárias são iguais nas duas formulações, e a resposta das variáveis que representam os arcos será sempre binária devido às características matemáticas adotadas na formulação do modelo com conectividade.

O tempo de resolução e a memória ocupada pela árvore do BBA variam de acordo com a formulação. Em geral, a formulação com conectividade demora mais tempo para ser resolvida, mas utiliza uma quantidade menor de memória. Isto pode representar uma vantagem especialmente quando o problema for de maiores dimensões, pois a árvore gerada pelo BBA durante a resolução do problema sem conectividade pode exceder a quantidade de memória disponível no computador antes do algoritmo encontrar uma solução inteira para o problema. Este risco seria menor para o problema com conectividade. O fato da floresta apresentar-se relativamente bem regulada pode ter influenciado no baixo esforço computacional para a resolução do modelo (MCDILL; BRAZE, 2000), uma vez que, associada ao grande número de regimes de manejo disponíveis, não seria difícil para o modelo encontrar uma solução inteira que atendesse as restrições de produção impostas.

O valor da função objetivo no modelo com conectividade apresentou um decréscimo de R\$ 50.478,38 (0,051%) em relação ao modelo sem conectividade. Esse valor pode ser considerado como o preço sombra, ou o custo de oportunidade, de se garantir uma conectividade mínima proposta entre os fragmentos florestais em todos os anos do horizonte de planejamento, uma vez que as duas soluções provaram serem ótimas.

Para implementar a conectividade entre os fragmentos ao longo do horizonte de planejamento, modelo alterou o regime de manejo em 14 unidades de manejo em relação às soluções com e sem conectividade. Estas alterações ocorreram nas idades de corte e/ ou nos períodos de corte para uma ou mais intervenções em um mesmo regime de manejo. Em ambos os casos, o modelo deu preferência a regimes de uma rotação por ciclo, evidenciando que o retorno obtido com o ganho de produtividade

esperado com a reforma do plantio compensa o diferencial de custo entre a reforma ou a condução da floresta.

A Figura 2.4 retrata o comportamento das variáveis controladas nos modelos com e sem conectividade, sendo 2.4(a) o fluxo anual de madeira para celulose, 2.4(b) o fluxo anual de madeira para energia, 2.4(c) a área reformada a cada ano, e 2.4(d) o total de recursos financeiros necessários para se manejar a floresta a cada ano.

Figura 2.4 – Comportamento das variáveis operacionais consideradas

Foram poucas as alterações nos fluxos das variáveis controladas entre os modelos das duas estratégias. O fluxo de produção de madeira para celulose apresentou quatro anos com variações superiores a 5%; de madeira para energia, cinco anos; de área reformada, quatro anos; e apenas três anos para os recursos financeiros utilizados. Esse resultado, associado ao reduzido número de unidades de manejo onde o regime de manejo foi alterado, explica o baixo custo de implementação da conectividade na floresta da Fazenda Empresarial.

Para melhor ilustrar os resultados, os três primeiros anos do plano de manejo da Fazenda Empresarial, nos modelos incorporando e sem incorporar a conectividade, são apresentados nas Figuras 2.5 a 2.7, sendo o mapa da esquerda o modelo incorporando a conectividade e o da direita, sem incorporá-la. Os mapas dos demais períodos do horizonte de planejamento podem ser observados no Anexo A.

Figura 2.5 – Mapas do primeiro período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 2.6 – Mapas do segundo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 2.7 – Mapas do terceiro período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

A alteração da estratégia de manejo resultante da incorporação da conectividade entre os fragmentos fica evidente logo no primeiro ano do horizonte de planejamento, onde o modelo adiou o corte de um talhão entre os fragmentos 1 e 2 de modo a estabelecer uma conexão entre esses dois fragmentos. Outras treze unidades de manejo tiveram os seus regimes de manejo alterados, nem sempre para compor diretamente o corredor, mas também para atender restrições de produção de madeira para celulose nos diferentes anos.

Entretanto, não houve grandes alterações nas estratégias de manejo, especialmente devido: ao elevado grau de permeabilidade dos fragmentos no plantio; da forma proposta de estabelecimento dos corredores, sendo uma ponte de ligação entre os fragmentos já aceita como uma conectividade mínima; a elevada probabilidade de que uma unidade de manejo possa compor o corredor uma vez que, como as idades de corte variam de 6 a 9 anos, o talhão apresenta as características para fazer parte do corredor de 50% a 67% dos períodos de tempo de uma provável rotação.

Os resultados também sugerem que o esforço, e conseqüentemente o custo de incorporação dos corredores de conectividade, pode ser menor em áreas com uma elevada densidade hidrográfica como é o caso da Fazenda Empresarial.

3.3.2 Parque Estadual Anhanguera

O objetivo de planejar o corte e a regeneração das áreas com eucalipto, mantendo a conectividade entre os fragmentos de vegetação nativa e atendendo a demanda anual de madeira a ser colhida, foi atingido com êxito. Como o valor da função objetivo será sempre o mesmo para qualquer solução viável, não há custo para a implementação da conectividade nesse caso. As demais características dos modelos incorporando e sem incorporar a conectividade são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resumo das características do modelo matemático

Característica	Com Conectividade	Sem Conectividade
Número de linhas	3.542	122
Número de colunas	7.565	1.100
Número de Variáveis Binárias	1.084	1.084
Tempo de resolução	30 min 41 seg*	12,0 seg*
Máxima memória ocupada pela árvore do BBA	0,11 MB	NA**
***Valor da função objetivo	307.904,16 m ³	307.904,16 m ³

* Esse foi o tempo necessário para todo o processamento do GAMS, incluindo a leitura dos dados, construção do modelo, resolução do modelo pelo CPLEX, e envio dos resultados para um arquivo MS-Excel. **O CPLEX resolveu o problema antes de emitir qualquer relatório sobre a quantidade de memória utilizada pelo algoritmo. ***A estratégia de ramificação utilizada pelo Branch-and-Bound foi ramificar o nó mais recentemente criado.

Na primeira tentativa de resolução desse problema, o CPLEX foi parametrizado de modo que o algoritmo Branch-and-Bound ramificasse o nó com o melhor valor da função objetivo que ainda não havia sido ramificado (opção default do CPLEX). Após duas horas de processamento sem chegar a uma solução viável, percebeu-se a característica do problema de apresentar sempre o mesmo valor da função objetivo para qualquer solução, podendo reduzir a performance do algoritmo sob o processo de ramificação estabelecido. Desse modo a tentativa de resolução foi interrompida e reiniciada com um processo de ramificação do Branch-and-Bound parametrizado para

escolher o nó mais recentemente criado. Com essa nova estratégia de busca, uma solução viável para o problema com conectividade foi obtida após trinta minutos de processamento.

A Figura 2.8 apresenta o fluxo de produção anual obtido pelas duas estratégias, incorporando e sem incorporar a conectividade.

Figura 2.8 – Fluxo de produção de madeira com as duas estratégias de manejo

Embora as soluções obtidas não sejam únicas para cada estratégia, é possível realizar algumas comparações entre os fluxos de produção das duas estratégias. O fluxo de abastecimento de madeira manteve-se sem grandes alterações, com variações superiores a 5% em seis dos quinze anos do horizonte de planejamento, sendo a variação percentual máxima de 11,30% no segundo ano do horizonte.

Os mapas do primeiro, décimo terceiro e décimo quarto período do horizonte de planejamento são apresentados nas Figuras 2.9 a 2.11 para melhor compreensão dos resultados. Os últimos períodos foram escolhidos por que a estratégia sem conectividade isolou dois dos quatro fragmentos no modelo sem conectividade nesses

períodos. Os mapas representando os demais períodos do horizonte de planejamento podem ser observados no Anexo B.

Figura 2.9 – Mapas do primeiro período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 2.10 – Mapas do décimo terceiro período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 2.11 – Mapas do décimo quarto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Quando as equações de estabelecimento dos corredores não foram consideradas, a estratégia de manejo proposta resulta no isolamento do Fragmento 4 no décimo terceiro período, conforme observado na Figura 2.10, e no isolamento dos Fragmentos 3 e 4 no décimo quarto período do horizonte de planejamento (Figura 2.11).

Como o valor da função objetivo das duas estratégias é igual, o único custo de implementação da conectividade deu-se em virtude do aumento do esforço computacional para a resolução do modelo, não havendo perda de madeira em virtude da incorporação dos corredores.

3.4 Conclusões

É possível considerar a formação de corredores de conectividade entre fragmentos de vegetação nativa adjacentes às florestas de produção no planejamento do manejo de tais florestas. Na realidade, o modelo desenvolvido pode ser aplicado em qualquer situação onde o gestor deseje conectar fragmentos da paisagem pré-determinados ao longo de vários períodos utilizando outros elementos da paisagem com determinadas características, por meio do manejo dos elementos desta paisagem.

A propriedade da programação em redes utilizada na formulação do modelo com garantias de conectividade permitiu que os arcos das redes que representaram os possíveis caminhos a serem estabelecidos na conexão fossem tratados como variáveis

contínuas e, ainda assim, sempre retornassem soluções inteiras, resultando na possibilidade de inserção das restrições espaciais sem o aumento do número de variáveis binárias no modelo.

A perda no valor da função objetivo pode ser utilizada como uma *proxy* do custo de implantação de tais corredores, faltando a valoração dos benefícios advindos dos mesmos para que possa ser calculada uma razão Benefício / Custo, a qual poderia ser utilizada como um indicador pelo gestor florestal para verificar se a implantação de tais corredores seria viável.

Avaliar o impacto do valor da produção mínima e máxima, além do número de unidades de manejo e de regimes de manejo disponíveis no tempo de processamento do modelo, visando verificar qual o número máximo aproximado de variáveis inteiras que o modelo teria condições de resolver com um esforço computacional viável, constitui uma linha de pesquisa sugerida para elaboração de trabalhos futuros.

Outras linhas de pesquisa a serem consideradas seriam: a inserção de metas mínimas para o agrupamento das áreas com características semelhantes, como unidades sob corte ou aptas a formarem corredores, visando a consideração de economias de escala no planejamento das áreas a serem colhidas ou o aumento da largura mínima dos corredores a serem estabelecidos, reduzindo o efeito de borda dos corredores; e a imposição da manutenção de um mesmo corredor de conectividade por mais de um período de tempo do horizonte de planejamento.

Referências

AUGUSTI, J.C.; FERRAZ, F.F.de; FERRAZ, S.F.DE; SILVA, J.F.DA; CAMARGO, S.L. Cultivo integrado com florestas naturais de baixo impacto. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v.4, p. 62-65, dez 2005.

BEIER, P; NOSS, R.F. Do habitat corridors provide connectivity? **Conservation Biology**, Oxford, v. 12, n. 6, p. 1241-1252, Dec 1998.

CERDEIRA, J.O.; GASTON, K.J.; PINTO, L.S. Connectivity in priority area selection for conservation. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v.10, n. 3, p. 183-192, Sep 2005.

DAMSCHEIN, E. I.; HADDAD, N.M.; ORROCK, J.L.; TEWKSBURY, J.J.; LEVEY, D.J. Corridors Increase Plant Species Richness at Large Scales (REPORTS). **Science**, Washington – DC, v. 313, n. 5791, p. 1284 – 1286, Sep 2006.

DARIO, F.R.; ALMEIDA, A.F. Influência de corredor florestal sobre a avifauna da Mata Atlântica. **Sciencia Forestalis**, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - Piracicaba, n. 58, p. 99-109, dez 2000. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr58/cap08.pdf>. Acesso em: 15 jun 2006.

HILLIER, F.S; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to operations research**. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 1061 p.

HOF, J.G.; BEVERS, M.; JOYCE, L.; KENT, B. An Integer Programming Approach for Spatially and Temporally Optimizing Wildlife Populations. **Forest Science**, Bethesda, v. 40, n. 1, p. 177-191, Feb 1994.

HORSKINS, K.; MATHER, P.B.; WILSON, J.C. Corridors and connectivity: when use and function do not equate. **Landscape Ecology**, AZ Dordrecht, v. 21, n. 5, Jul 2006. Disponível em: <http://www.springerlink.com/w10077.dotlib.com.br/content/84qq533865702442/fulltext.pdf>. Acesso em: 20 nov 2006.

INFORMATIVO CEPEA – SETOR FLORESTAL. Piracicaba, n. 59, Nov 2006. 4 p. Disponível em : <http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/inform59.pdf>. Acesso em: 20 dez 2006.

JORDÁN, F. A reliability-theory approach to corridor design. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 128, n. 2/3, p. 211-220, Apr 2000. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03043800>. Acesso em: 15 out 2005.

McDILL, M.E.; BRAZE, J. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age-class distributions. **Forest Science**, Bethesda, v. 46, n. 3, p. 423-436, Aug 2000.

NOBRE, S.R.; RODRIGUEZ, L.C.E. Analysis and evaluation of the R-Ratio heuristic for forest scheduling. BEVERS, MICHAEL; BARRETT, TARA M.(Comp.).: In: SYMPOSIUM SYSTEMS ANALYSIS IN FOREST RESOURCES; 2003. Stevenson, Oct 7-9, Stevenson, WA. Portland, OR: USDA Forest Service, 2005. p. 287-295. **USDA Forest Service – General Technical Report PNW-GTR-000**

ÖNAL, H.; BRIERS, R.A. Designing a conservation reserve network with minimal fragmentation: A linear integer programming approach. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v. 10, n. 3, Sep 2005. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/k1q2527q368u043g/fulltext.pdf>. Acesso em: 16 de set 2006.

PRIMACK, R.B.; RODRIGUES, E. **Biologia da Conservação**. Londrina: E. Rodrigues, 2001. 328p.

SESSIONS, J. Solving for habitat connections as a steiner network problem. **Forest Science**, Bethesda, v. 38, n. 1, p.203-207, Feb 1992.

SIMBERLOFF, D.; COX, J. Consequences and costs of conservation corridors. **Conservation Biology**, Oxford, UK, v. 1, n. 1, p. 63-71, May 1987. Disponível em: <http://www.blackwell-synergy.com/doi/pdf/10.1111/j.1523-1739.1987.tb00010.x>. Acesso em: 20 mar 2007.

SUSTAINABLE FORESTRY INITIATIVE: 2005 – 2009 Standard. Sustainable Forestry Board (SFB) and American Forest & Paper Association (AF&PA), 2005. 27 p. Disponível em: <<http://www.aboutsfb.org/generalPDFs/SFBStandard2005-2009.pdf>>. Acesso em: 15 nov 2006.

WILLIAMS, J.C. Delineating protected wildlife corridors with multi-objective programming. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v. 3, n. 1/2, p. 77-86, Mar 1998.

WINSTON, W.L. **Operations research: applications and algorithms**. 4th ed. Canada: THOMSON Brooks/Cole, 2004. 1434 p.

4 A INCORPORAÇÃO DE CORREDORES DE CONECTIVIDADE EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DE FLORESTAS INDUSTRIAIS: uma abordagem da Heurística da RazãoR.

Resumo

As restrições espaciais, que caracterizam a paisagem onde são conduzidas muitas das florestas industriais, ao serem incorporadas em formulações matemáticas do problema de planejamento, introduzem relações combinatoriais que tornam a solução desses problemas bastante difícil. A integração de fragmentos de florestas naturais por meio de corredores formados por talhões de florestas industriais para o estabelecimento de metapopulações é um desses problemas. Alguns métodos para resolver esse difícil problema já foram propostos. O objetivo desse trabalho é aplicar, aprimorar e avaliar o desempenho de um método heurístico denominado RazãoR, desenvolvido para a resolução de problemas de planejamento florestal formulados integralmente com variáveis binárias e de acordo com o modelo Tipo I (NOBRE; RODRIGUEZ, 2005). A heurística da Razão foi adaptada para a incorporação de corredores de conectividade entre fragmentos florestais adjacentes aos talhões de florestas industriais. Uma metodologia para avaliação do déficit de conectividade das soluções propostas foi desenvolvida com sucesso a partir de um algoritmo recursivo que se baseia na Teoria de Grafos e em técnicas de programação dinâmica. Uma fazenda de uma empresa de celulose do estado de São Paulo foi utilizada como estudo de caso para aplicação e avaliação do método proposto. A heurística se mostrou eficaz e eficiente em termo do número de iterações necessárias para encontrar boas soluções viáveis para o problema apresentado. O valor da função objetivo das soluções encontradas variaram de 99,71% a 99,83% do valor da solução ótima, com um número de iterações variando de 38 a 101, com uma média de 48 iterações. Entretanto, o tempo computacional necessário para a heurística encontrar soluções viáveis foi, em média, cinco vezes superior ao tempo necessário para que o modelo matemático de programação linear inteira mista encontrasse a solução ótima do problema. A ineficiência computacional da heurística não deve ser considerada como um resultado conclusivo uma vez que o algoritmo foi programado em visual basic for applications de uma planilha MS-Excel, restando espaço para melhorias no tempo de execução do algoritmo caso seja implementado em uma linguagem de programação voltada para o desenvolvimento de executáveis de alto desempenho. A heurística ainda pode ser um método viável para gestores florestais que não disponham de softwares comerciais para resolução de modelos de programação linear inteira mista. O desempenho computacional da heurística não pode ser comparada ao desempenho de programas comerciais para solução de problemas de programação inteira, uma vez que não foi programada para máximo desempenho. As macros Excel escritas em Visual Basic para gerar um ambiente de teste para a heurística não resulta na solução mais rápida e deveria ser codificado numa linguagem mais eficiente. A heurística mostra potencial para ser usada como método de solução de problemas não tratáveis por técnicas convencionais de programação linear inteira.

Palavras-chave: Heurísticas, RazãoR; Manejo florestal otimizado; Corredores de conectividade; Programação dinâmica

Abstract

The spatial constraints that characterize landscapes where industrial forests are managed, when considered in mathematical formulations of the planning problem, introduce combinatorial relations that turn the solution of such problems very difficult. The integration of fragments of natural forests using corridors formed by industrial forest stands to the establishment of metapopulations is one of these problems. Some methods to solve this difficult problem have already been proposed. The main objective of this paper is to apply, improve and evaluate the performance of a heuristic method named R-ratio, developed to solve forest planning problems that consider exclusively binary variables and are formulated as a model Type I harvest scheduling problem (NOBRE; RODRIGUEZ, 2005). The R-ratio heuristic was adapted to incorporate connectivity corridors among natural forest fragments adjacent to industrial forest stands. To implement the corridors into the heuristic, a method to evaluate the connectivity deficit is required, and was implemented by a recursive algorithm that relies on Graph Theory principles and dynamic programming techniques. The heuristic was used to solve a study case involving a industrial forest farm that supplies round wood to a pulpwood company in the State of São Paulo. The method was effective in creating feasible solutions to the problem after a few number of interactions. The objective function value of the solutions provided by the heuristic vary from 99,71% a 99,83% of the optimal solution found by a mixed integer linear programming, taking 38 to 101 interactions to solve the problem, with an average of 48 interactions. Meanwhile, the computational time needed for the heuristic to solve the problem was, on average, five times higher than the time taken by the integer programming formulation to provide an optimal solution. The computational performance of the heuristic cannot be compared to the performance of the commercial software used to solve the integer formulation, once it was not programmed for maximum performance. The Visual Basic Excel macros used to provide the test environment do not provide the fastest software solution and should be replaced by a more efficient code. The heuristic shows potential to be used as a solution method for problems not solvable by conventional mixed integer linear programming formulations.

Keywords: Heuristics; R-ratio; Optimized forest management; Connectivity corridors; Dynamic programming

4.1 Introdução

As florestas sempre desempenharam um importante papel na história da humanidade devido a sua capacidade de manutenção da qualidade do ambiente, ofertando uma gama de produtos e serviços de vital importância para a sociedade

(GARCIA; BORTOLETTO JÚNIOR, 2005). O reconhecimento dessa importância cresceu a partir do final do século XX, e atualmente a sociedade requer que o setor produtivo utilize técnicas de produção de baixo impacto ambiental, de modo a aliar a produção de bens e serviços com a conservação da biodiversidade. Atender a essa requisição se torna ainda mais desafiador uma vez que a demanda pelo uso dos recursos naturais cresceu com o aumento significativo da população mundial (MEYER; TURNER, 1994), sendo necessário o uso de modernas técnicas de gestão para auxiliar os gestores florestais a cumprir com esses objetivos.

Segundo Davis et al. (2005), a consideração de questões ambientais e sociais nos critérios que norteiam o manejo florestal sustentável faz parte das organizações norte-americanas públicas e privadas desde a segunda metade do século passado. Esta tendência também têm sido observada nas organizações brasileiras a partir dos anos noventa, inclusive em empresas florestais do ramo de papel e celulose, conforme mencionado no trabalho de Augusti et al. (2005).

A incorporação de restrições ambientais, em especial àquelas envolvendo o manejo do espaço e da paisagem, tem se constituído em um dos campos de fronteira do conhecimento da pesquisa internacional na área de otimização do planejamento do manejo sustentado de florestas. O problema mais freqüentemente abordado nestes estudos é a limitação da área máxima contígua de corte¹¹ por período do horizonte de planejamento, o qual já se constituiu em norma de manejo sustentável para a Associação dos Produtores de Papel e Celulose dos países da América do Norte (SUSTAINABLE FORESTRY INITIATIVE, 2005). Outro problema que tem ganhado destaque é a escolha de áreas para compor corredores de conectividade¹² entre fragmentos da paisagem. O problema de conectividade é reconhecido por resultar em modelos de otimização da paisagem mais complexos (MARTELL; GUNN; WEINTRAUB, 1998).

O estabelecimento de corredores de conectividade entre fragmentos separados é importante para permitir o aumento da população viável e facilitar o fluxo genético, possibilitando a recolonização dos fragmentos com populações de tamanho reduzido,

¹¹ Conhecido como o problema de adjacência ou “Green-up Constraints”.

¹² Conhecido como o problema de conectividade.

resultando num aumento do tamanho e das chances de sobrevivência das populações de várias espécies, além de reduzir a pressão do entorno sobre as áreas protegidas (ARRUDA, 2004; FONSECA et al., 2004), representando um ponto estratégico para a conservação dos ambientes naturais fragmentados (GALINKIN et al., 2004).

Embora nem sempre o estabelecimento de um corredor de conectividade resulte em um aumento do fluxo genético das populações que habitam os fragmentos conectados (HORSKHINS; MATHER; WILSON, 2006), uma vez que esse depende também do comportamento das espécies, existe um certo consenso no meio científico que seu o estabelecimento aumenta a viabilidade das populações residentes nos fragmentos conectados (BEIER; NOOS, 1998).

Sendo assim, o estabelecimento dos corredores emerge como uma condição necessária, porém não suficiente, para o aumento da viabilidade das populações presentes em fragmentos de vegetação.

De um modo geral, os problemas de otimização do manejo sustentado de florestas considerando questões espaciais apresentam natureza combinatorial, resultando em modelos de difícil resolução. Como consequência, diversos métodos de resolução têm sido testados pela comunidade científica internacional.

Para resolver esses problemas, alguns autores sugerem algoritmos como a programação dinâmica (HOGANSON; BORGES, 1998; BORGES; HOGANSON, 1999), o algoritmo gerador de colunas¹³ (WEINTRAUB; BARAHONA; EPSTEIN, 1994), ou formulações de modelos de programação linear inteira mista (PLIM) (CERDEIRA et al., 2005; GOYCOOLEA et al., 2005; MCDILL; BRAZE, 2000, 2001; MCDILL; REBAIN; BRAZE, 2002; REBAIN; MCDILL, 2003; ÖNAL; BRIERS, 2005; WILLIAMS, 1998). McDill e Braze (2001) afirmam que formulações de PLIM deveriam ser preferíveis, pois podem ser solucionadas por softwares comerciais que utilizam os algoritmos branch and bound (BBA)¹⁴ e cutting plane. Tais formulações são mais generalistas e esses softwares comerciais já estão desenvolvidos e em constante evolução, possibilitando a resolução de problemas cada vez maiores e mais complexos na medida em que

¹³ “Column Generation”.

¹⁴ Algoritmo para solução de problemas de programação linear com variáveis inteiras.

versões mais elaboradas sejam disponibilizadas no mercado e que a capacidade de processamento dos computadores aumenta.

Entretanto, ao considerar problemas de manejo florestal de tamanho real, geralmente a dimensão das matrizes de dados e o número de variáveis inteiras presentes nas formulações ultrapassam a capacidade atual de resolução dos computadores e softwares comerciais em um tempo aceitável, de modo que outros autores preferem utilizar métodos heurísticos para a resolução de tais problemas, mesmo que tais métodos não garantam uma solução ótima. Essa preferência se deve geralmente à redução expressiva do tempo computacional necessário para a resolução de modelos com restrições espaciais em escala real.

De acordo com Hillier e Lieberman (2005), um método heurístico é um procedimento desenvolvido para descobrir uma boa solução viável, mas não necessariamente a solução ótima, especificamente para o problema considerado. Geralmente constitui-se de um algoritmo iterativo, onde a cada iteração é realizada uma busca por uma nova solução que seja melhor do que a solução anteriormente encontrada. O algoritmo é encerrado após um determinado número de iterações, e a melhor solução obtida é apresentada.

As abordagens mais utilizadas para solucionar os problemas de planejamento do manejo de florestas com restrições espaciais envolvem heurísticas desenvolvidas pelos próprios autores (CERDEIRA et al., 2005; FALCÃO; BORGES, 2002; LOEHLE, 1999; MURRAY, 1999; SESSIONS, 1992), ou heurísticas de uso comum em outras áreas, como a Busca Tabu¹⁵ (CARO et al., 2003), “simulated annealing” (LOCKWOOD; MOORE, 1993; ÖHMAN, 2000; ÖHMAN; ERIKSSON, 1998), ou ainda um misto de programação linear e “simulated annealing” (ÖHMAN; ERIKSSON, 2002).

A resolução de problemas do estabelecimento de corredores entre fragmentos florestais utilizando métodos heurísticos foi abordada nos trabalhos de Sessions (1992), Loehle (1999), Cerdeira et al. (2005) e Fuller e Sarkar (2006).

Sessions (1992) modelou a conectividade como um problema de rede, onde áreas chaves de habitat que deveriam ser preservadas seriam previamente designadas e as unidades necessárias para conectar estas áreas chaves seriam escolhidas como

¹⁵ “Tabu Search”.

resultado de uma rede Steiner¹⁶, minimizando a perda de madeira não colhida resultante da designação de tais áreas como um corredor para conectividade e utilizando uma abordagem heurística para a sua solução.

Loehle (1999) propôs um algoritmo, baseado na dispersão e no reconhecimento de odores, para encontrar o caminho mais curto ao conectar fragmentos isolados na paisagem. O algoritmo apresentou-se eficiente e eficaz para conectar fragmentos, alterar o seu formato e aumentar a sua área interior.

Cerdeira et al. (2005) implementaram uma heurística em três estágios para resolver o problema de encontrar uma rede conectada na paisagem, minimizando o número de fragmentos, e contendo todas as espécies presentes na paisagem. Os autores inseriram a conectividade como parte das restrições do problema e consideraram apenas soluções viáveis no seu algoritmo. A heurística apresentou-se eficaz e eficiente para resolução do problema, retornando soluções viáveis muito próximas da solução ótima e com um esforço computacional inferior a um minuto, enquanto a solução ótima obtida pelo Branch-and-Bound demorou mais de onze horas para ser obtida.

Fuller e Sarkar (2006) desenvolveram um software para análise e implementação de corredores de conectividade entre áreas de conservação visando a formação de corredores com maior qualidade ambiental ou menor área. A conectividade entre os fragmentos foi representada como um grafo e os autores utilizaram um algoritmo para encontrar as menores árvores que abrangessem todos os nós (fragmentos) para resolver o problema. O algoritmo mostrou-se capaz de lidar com problemas de conexão de áreas a serem conservadas bem maiores que os métodos tradicionalmente utilizados.

Todos os trabalhos citados anteriormente visaram minimizar o custo de implementação da conectividade ou maximizar a qualidade ambiental do corredor a ser implementado. No entanto, a literatura ainda encontra-se carente de trabalhos que mantenham os objetivos tradicionais do planejamento do manejo florestal, como a maximização dos lucros ou da produção, incorporando a formação de corredores de conectividade no plano de manejo proposto.

¹⁶ O problema de rede Steiner difere do problema “the minimum spanning tree” pois não é necessário que todos os nós da rede estejam conectados.

Uma nova formulação que maximize o lucro advindo da floresta garantindo a conectividade entre áreas de interesse ao longo de todo o horizonte de planejamento foi apresentada no capítulo anterior. Entretanto esta formulação pode não ser capaz de lidar com alguns problemas de manejo florestal em escala real devido à sua natureza combinatorial, o que incentiva o autor a propor uma abordagem heurística para a resolução do problema.

Rodriguez (1994) desenvolveu um novo processo heurístico para lidar com os problemas de manejo florestal com variáveis inteiras em larga escala, representado através do Modelo Tipo 1 (DAVIS et al., 2005), sendo denominado Heurística da RazaoR. Essa heurística foi aprimorada no trabalho de Nobre (1999), tanto no aspecto de sua lógica como na sua implementação computacional, mostrando-se um método promissor para resolução de problemas de manejo de florestas com variáveis inteiras.

A heurística da RazaoR separa as variáveis, que representam os regimes de manejo associadas a cada unidade de manejo, em três grupos distintos: as selecionadas, que constituem a base do problema; as não-selecionadas e as descartadas. Ela inicia o processo com a escolha da melhor solução inteira possível, sem se preocupar com as restrições do problema. Em seguida avalia a vizinhança da solução atual, a qual é construída pela substituição das variáveis da base por variáveis do grupo das não-selecionadas, em termos de redução do Valor Total do Projeto (VTP) e redução do déficit em relação às metas impostas pelas restrições (metas de produção anual). Posteriormente, ela estabelece uma razão entre a redução do déficit e a redução do VTP, sendo esta a RazaoR que guiará a busca. Então a heurística seleciona a variável que apresenta a maior RazaoR para entrar na base, removendo-a do grupo das não selecionadas e passando para o grupo das selecionadas. A variável que sai da base vai para o grupo das descartadas.

Para melhorar e diversificar o processo de busca, a heurística visita o grupo das soluções descartadas periodicamente, sendo esta periodicidade imposta pelo usuário através dos parâmetros alfa (iteração na qual o grupo das descartadas é visitado pela primeira vez) e beta (número de iterações onde esta visita se repete). A heurística procede desta forma até encontrar uma solução com déficit zero, ou ultrapassar o

número máximo de iterações definido pelo usuário, ou não haver forma de continuar o processo de busca.

Caso ela tenha encontrado uma solução com déficit zero, inicia então um novo processo chamado Fase Verde, onde todas as variáveis que não estão na base são avaliadas a cada iteração, e aquelas que mantêm o déficit zero e aumentam o VTP são consideradas, sendo escolhida a que proporciona o maior aumento do VTP. A Fase Verde termina quando não é encontrada nenhuma variável que, ao entrar na base, mantenha o déficit igual a zero e aumente o VTP, sendo esta a solução final apresentada pela heurística. Uma descrição detalhada do funcionamento da heurística da RazaoR, bem como uma avaliação do seu processo de busca à luz dos conceitos da inteligência artificial, está disponível nos trabalhos de Nobre (1999) e Nobre e Rodriguez (2005).

O desafio proposto nesse trabalho consiste em sugerir os ajustes necessários para que a heurística da RazaoR possa lidar o planejamento do manejo de florestas equiâneas considerando as metas anuais de produção em conjunto com a necessidade de se garantir corredores de conectividade entre fragmentos adjacentes às essas florestas.

Para que este objetivo seja alcançado, os seguintes objetivos secundários são propostos:

- c) O desenvolvimento de um método para mensurar o déficit de conectividade das soluções;
- d) Inserir este método na Heurística da Razão R, inclusive com as sugestões de modificação ou inclusão de parâmetros adicionais para tornar a busca mais eficiente.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Fonte de dados

O estudo de caso considerado é composto por uma fazenda pertencente a uma empresa de celulose e papel do estado de São Paulo, a qual será chamada de Fazenda Empresarial. A fazenda possui 6.262 hectares, sendo 1.571 ha ocupados com

vegetação nativa, 4.419 ha com plantios de eucalipto e 272 ha ocupados com áreas de outros usos. A distribuição da área por classes de idade e por rotação atual dos plantios de eucalipto podem ser observadas na Figura 3.1(a), a Figura 3.1(b) apresenta a curva média de produção esperada, de madeira de celulose e energia, dos talhões da fazenda em primeira e segunda rotação.

Figura 3.1 – Distribuição de área por idades (a) e Curva de prognose de produção (b) para a Fazenda Empresarial

O mapa da Fazenda Empresarial, com a localização das Unidades de Manejo, dos fragmentos de floresta nativa e das áreas de outros usos, bem como os caminhos utilizados para a formação dos possíveis corredores, pode ser observado na Figura 3.2. Os regimes de manejo foram elaborados a partir de uma macro programada em uma planilha Excel cujo objetivo é a geração das matrizes dos coeficientes necessários ao modelo de programação linear para a otimização do problema de manejo florestal sob o regime de talhadia. A macro gera os regimes com até três rotações por ciclo de produção, com alternância entre ciclos dentro de um mesmo regime, resultando em um aumento exponencial do número de regimes de manejo com o aumento do horizonte de planejamento.

O Fragmento 1 foi escolhido como unidade de origem para a formação do corredor devido a sua localização mais centralizada, os demais fragmentos foram designados como unidades de destino, e as unidades de manejo foram definidas como unidades de passagem. Em acordo com os técnicos da empresa, decidiu-se por considerar a idade do plantio como a característica que permitirá as Unidades de Manejo serem escolhidas para compor o corredor em um determinado período, sendo estipulado uma idade maior ou igual a três anos para tornar a unidade de manejo apta a fazer parte do corredor.

4.2.2 O método proposto para avaliação do déficit de conectividade.

Como o problema de conectividade já havia sido representado de forma satisfatória por meio de um grafo no capítulo anterior, decidiu-se manter a representação e buscar soluções para calcular o déficit de conectividade das soluções de forma eficaz e eficiente. O método proposto utiliza um algoritmo recursivo apresentado no texto de Maurer e Ralston (2004), muito utilizado na teoria dos grafos para resolução de problemas de programação dinâmica (WINSTON, 2004), bem como de alguns problemas de programação em redes (HILLIER; LIEBERMAN, 2005).

Uma desvantagem deste método é que ele não permite a inclusão de arcos bi-direcionados, pois o algoritmo recursivo entraria em um processo circular de cálculo. Deste modo, o gestor deve escolher apenas um arco direcionado que ligue duas unidades de manejo para representar uma conexão do corredor. Entretanto, a eficiência de cálculo do algoritmo recursivo compensa esta desvantagem (MAURER; RALSTON, 2004), uma vez que a heurística precisará calcular o déficit de conectividade milhares de vezes a cada iteração.

A fórmula utilizada para o cálculo do déficit de conectividade de cada unidade de manejo é apresentada na eq. (3.1).

$$Def_{It} = b_{It} \cdot \text{ÁREA}_I + \text{Min}_K \{ Def_{Kt} | K \in A_I \} \quad (3.1)$$

Onde:

I, K - unidades de manejo (UM);

J - regime de manejo (RM);

t - período do horizonte de planejamento;

A_I - conjunto das UM's de manejo que possuem arcos entrando na UM I;

Def_{It} - déficit de conectividade, em hectares, do talhão I no período t;

b_{It} - parâmetro refletindo a condição da UM I, submetido ao RM J, no período t;

Ao proceder com o cálculo do déficit de conectividade (em hectares) de cada UM, a variável Def_{It} adiciona ao déficit da UM I o menor déficit acumulado nas UM's que apresentam arcos terminando na UM I. Deste modo, quando o déficit de conectividade dos fragmentos de destino (2 a 4) são calculados, ele representa o déficit de conectividade do caminho composto, entre o Fragmento de origem e o Fragmento de destino em questão, pelas UM's que apresentam a menor área possível com UM's que não estariam aptas a fazer parte do corredor.

O parâmetro b_{It} assume valor zero para UM's que possam fazer parte do corredor no período t, um para UM's que não possam fazer parte do corredor e não estejam sendo cortados no período t, e dez para UM's que estejam sendo cortadas no período t. O objetivo de penalizar as UM's que estão sofrendo corte é não considerá-las no cálculo do déficit de conectividade, uma vez que tais atividades desestimulam fortemente o trânsito da fauna nessa UM durante a sua realização.

4.2.3 O modelo utilizado para o cálculo da heurística.

As equações abaixo são necessárias para o processo de cálculo da heurística.

$$VTP = \sum_{i=1}^n A_i D_{ij} x_{ij} \quad j \in S \quad (3.2)$$

$$VTP_{aval} = \sum_{i=1}^n A_i D_{ik} x_{ik} \quad k \in G \quad (3.3)$$

$$Prod_t = \sum_{i=1}^n A_i v_{ijt} x_{ij} \quad j \in S \quad (3.4)$$

$$ProdAval_t = \sum_{i=1}^n A_i v_{ikt} x_{ik} \quad k \in G \quad (3.5)$$

$$DefP_t = \begin{cases} Prod_t - Teto_t & se \quad Prod_t > Teto_t \\ Piso_t - Prod_t & se \quad Prod_t < Piso_t \\ 0 & se \quad Piso_t \leq Prod_t \leq Teto_t \end{cases} \quad (3.6)$$

$$DefPAval_t = \begin{cases} ProdaVal_t - Teto_t & se \quad ProdaVal_t > Teto_t \\ Piso_t - ProdaVal_t & se \quad ProdaVal_t < Piso_t \\ 0 & se \quad Piso_t \leq ProdaVal_t \leq Teto_t \end{cases} \quad (3.7)$$

$$DefProd = \sum_{t=1}^T DefP_t \quad (3.8)$$

$$DefProdAval = \sum_{t=1}^T DefPAval_t \quad (3.9)$$

$$DefConec = \sum_{l \in E} \sum_{t=1}^T Def_{Et} \quad (3.10)$$

$$DefConecAval = \sum_{l \in E} \sum_{t=1}^T DefAval_{Et} \quad (3.11)$$

$$\Delta VTP = VTP - VTP_{Aval} \quad (3.12)$$

$$\Delta Deficit = DefProd - DefProdAval \quad (3.13)$$

$$+ PesoConec(DefConec - DefConecAval)$$

$$Pond = DefTotal_{Ini} / VTP_{Ini} \quad (3.14)$$

$$RazaoR = \begin{cases} \Delta Deficit & se \quad \{\Delta Deficit \geq 0, \Delta VTP \leq 0\} \\ \Delta Deficit / \Delta VTP & se \quad \{\Delta Deficit \geq 0, \Delta VTP > 0\} \\ (Pond / N^\circ It)(\Delta VTP / \Delta Deficit) & se \quad \{\Delta Deficit < 0, \Delta VTP < 0\} \\ SemMelhora & se \quad \{\Delta Deficit < 0, \Delta VTP \geq 0\} \end{cases} \quad (3.15)$$

Onde:

i - Unidades de manejo (UM);

j, k - Regimes de manejo (RM);

t - Período do horizonte de planejamento;

S - Conjunto dos RM da solução selecionada a cada iteração;

G - Conjunto dos RM pertencentes às variáveis do grupo avaliado na iteração, podendo ser das não selecionadas ou das descartadas;

E - Conjunto dos Fragmentos de destino dos corredores de conectividade;

A_i - Área da Unidade de Manejo i ;

D_{ij} - Contribuição para a função objetivo caso a Unidade de Manejo i seja associada ao Regime de Manejo j ;

x_{ij} - Variável binária que representa a escolha do RM j para a UM i ;

v_{ijt} - Produção de madeira da Unidade de Manejo i no período t quando associada ao Regime de Manejo j ;

VTP - Valor total do projeto da solução selecionada;

VTP_{Aval} - Valor total do projeto de cada solução avaliada;

$Prod_t$ - Volume produzido pela solução selecionada no período t ;

$Prod_{Aval_t}$ - Volume produzido pela solução avaliada no período t ;

$DefP_t$ - Déficit de produção no período t resultante da solução selecionada;

$Teto_t$ - Quantidade máxima de madeira a ser produzida no período t ;

$Piso_t$ - Quantidade mínima de madeira a ser produzida no período t ;

$DefP_{Aval_t}$ - Déficit de produção no período t resultante de cada solução avaliada;

$DefProd$ - Déficit total de produção da solução selecionada;

$DefProd_{Aval}$ - Déficit total de produção de cada solução avaliada;

Def_{APPt} - Déficit de conectividade acumulado no período t pela solução selecionada;

$Def_{Aval_{APPt}}$ - Déficit de conectividade acumulado no período t por cada solução avaliada;

$DefConec$ - Déficit total de conectividade (em hectares) da solução selecionada;

$DefConec_{Aval}$ - Déficit total de conectividade (em hectares) de cada solução avaliada;

ΔVTP - Variação no valor total do projeto caso a solução avaliada seja escolhida como a próxima solução selecionada;

$PesoConec$ - Parâmetro que serve para ponderar o valor do déficit de conectividade em relação ao déficit de produção;

$\Delta Deficit$ - Variação no valor total do déficit em relação às metas impostas pelas restrições, caso a solução avaliada seja escolhida como a próxima solução selecionada;

$SemMelhora$ - Parâmetro inserido pelo usuário para que as soluções avaliadas que corresponda a quarta condição do cálculo da $RazaoR$ assumam, este é um valor de referência que serve como regra de parada da heurística, assim como o número máximo de iterações;

$Pond$ - Parâmetro de ponderação;

$DefTotal_{ini}$ - Déficit total calculado para a solução inicial do problema;

VTP_{ini} - Valor Total do Projeto para a solução inicial do problema;

$RazaoR$ - Variável que guia o processo de escolha da heurística na busca de boas soluções viáveis;

$N^{\circ}It$ - Número de iterações efetuadas durante a busca;

As equações (3.2) e (3.3) calculam o valor total do projeto da atual seleção escolhida e da seleção candidata a cada iteração, respectivamente. As equações (3.4) a (3.11) exercem o papel de avaliar o grau de não viabilidade das soluções selecionadas e avaliadas em relação às metas impostas pelas restrições. Vale salientar que, enquanto as equações (3.8) e (3.10) não atinjam valor zero, a heurística procede em sua busca em todo o espaço de soluções, tanto as viáveis como as não viáveis. Quando uma solução que zera estas duas equações é selecionada, a heurística inicia o processo de busca denominado de Fase Verde, o qual restringe o espaço de soluções avaliadas àquelas que sejam viáveis. A equação (3.15) é a função de avaliação que guia o processo de busca da heurística, que procede com a busca escolhendo sempre a variável avaliada que apresente o maior valor da $RazaoR$ para entrar na base e passar a compor o grupo das selecionadas. Nobre (1999) ressalta que a $RazaoR$ realiza sempre o mesmo caminho de busca para um mesmo conjunto de parâmetros alfa e

beta, retornando sempre a mesma solução. Uma maneira sistemática de fazer a heurística investigar diferentes caminhos, chegando a diferentes soluções, é alterar de forma organizada o valor dos parâmetros alfa e beta.

Nesta nova formulação, a inserção de um parâmetro para ponderar as diferentes restrições impostas ao problema, as metas de produção e a conectividade, torna-se necessária, sendo este um terceiro parâmetro a influenciar a rota de busca da heurística.

Além disso, a equação (3.15) foi modificada em relação a função original de avaliação apresentada por Rodriguez (1994) e Nobre (1999), especificamente na forma de avaliação para alternativas que apresentem aumento no déficit de produção e aumento no VTP. A lógica de guia para a escolha da melhor *RazaoR* baseia-se na seleção da alternativa que, proporcionalmente, reduza ao máximo o valor do déficit com o menor custo, avaliado em termos de redução da função objetivo, neste caso o VTP. A terceira condição de cálculo da *RazaoR*, apresentada pela equação (3.15), possibilita que a heurística selecione soluções que aumentem o déficit em relação as metas, desde que esta solução aumente o VTP. Isto possibilita uma maior diversificação do processo de busca e uma recuperação do VTP ao longo do processo antes de se entrar na Fase Verde.

Anteriormente a fórmula da terceira condição era semelhante a da segunda, o que resultava em maiores valores para a *RazaoR* para soluções que, possibilitando um mesmo aumento no VTP, resultem no maior incremento possível do déficit, guiando de forma oposta à lógica que deu origem à heurística. De modo a manter a lógica da heurística, o cálculo da terceira condição foi modificado, invertendo-se os termos da razão. Esse procedimento trouxe a luz um novo problema, de escala entre as duas grandezas, de modo que se percebeu a necessidade de inserir um ponderador para trazer o valor da *RazaoR* sob esta condição a patamares semelhantes as outras condições. O ponderador também foi dividido pelo número de iterações do processo de busca, visando tornar as soluções que aumentem o déficit total menos atrativas a medida que o processo demore mais, aumentando a convergência da heurística. Essa estratégia foi implementada porque, segundo Nobre (1999), a heurística da *RazaoR* piora o valor da solução final a medida que o processo de busca se prolonga.

A equação (3.15) apresenta a nova função de avaliação da *RazaoR*.

4.2.4 Materiais utilizados

A heurística foi programada em um compilador comercial (Visual Basic for Applications – VBA) de simples utilização integrada a uma planilha de cálculo (MS Excel), que não gera um programa executável de alto desempenho. De acordo com Dalton (2005), as macros desenvolvidas em VBA são interpretadas, significando que, no momento de sua execução, o interpretador lê cada linha por vez, organizando o código enquanto checa erros de sintaxe, depois compila o código e só então o executa, sendo este um processo mais lento de que aquele realizado por programas executáveis. A escolha do VBA como compilador comercial deu-se pela falta de familiaridade do autor com outras linguagens de programação. Isso abre espaço para melhoria da performance do algoritmo implementado na heurística através da adaptação do código para uma linguagem de programação voltada para produção de rotinas mais rápidas, e com a geração de programas executáveis. Os mapas para apresentação dos resultados foram configurados com o auxílio do software ArcGIS 9.1.

4.3 Resultados e Discussão

O método proposto para avaliação do déficit de conectividade funcionou corretamente, e foi implementado na heurística da *RazaoR* com sucesso. A heurística realiza a busca por uma solução viável reduzindo tanto o déficit de produção quanto o de conectividade, até encontrar uma solução viável para o problema, quando a Fase Verde é iniciada, ou não encontrar nenhuma solução que apresente um valor da *RazaoR* superior ao parâmetro *SemMelhora*. A solução inicial¹⁷ apresentou um VTP de R\$ 100.403.284,87, um déficit de produção igual a 272.826,66 m³ de madeira e um déficit de conectividade de 851,68 ha.

Foram efetuadas cento e quarenta diferentes estratégias de busca de uma solução, tendo a heurística encontrado soluções viáveis para todas elas. As estratégias foram

elaboradas com a variação dos parâmetros alfa, beta e *PesoConec*, nos seguintes valores: alfa = {10, 30, 50, 70}, beta = {3, 6, 9, 12, 15}, e *PesoConec* = {100, 600, 1100, 3000, 7000, 11000, 15000}.

O problema também foi resolvido com um modelo de programação linear inteira mista, visando obter a solução ótima para comparação com os resultados obtidos pela heurística. A solução ótima apresentou um VTP de R\$ 99.745.798,01, sendo obtida pelo GAMS 22.0 e CPLEX 10.1 após um minuto e cinquenta e quatro segundos de processamento.

Para efetuar as cento e quarenta estratégias de busca, a macro levou 24 horas, 17 min e 25 segundos, com uma média de 10 min e 25 seg para a resolução de cada estratégia. A melhor solução obtida foi de R\$ R\$ 99.576.615,20, e a pior solução foi de R\$ 99.461.451,74, representando 99,83% e 99,71% da solução ótima, respectivamente. Para uma melhor visualização dos resultados, classificou-se o VTP das 140 estratégias em seis classes de valores. A Tabela 3.1 apresenta as classes definidas e os seus respectivos intervalos de Valor Total do Projeto (VTP). Na Figura 3.3 pode ser observado o histograma dos VTP's das cento e quarenta estratégias executadas de acordo com as classes as quais pertencem.

Tabela 3.1 – Definição das classes das soluções de acordo com o seu VTP

Classe	Intervalo VTP
A	[R\$ 99.450.000,00 ; R\$ 99.475.000,00]
B	(R\$ 99.475.000,00 ; R\$ 99.500.000,00]
C	(R\$ 99.500.000,00 ; R\$ 99.525.000,00]
D	(R\$ 99.525.000,00 ; R\$ 99.550.000,00]
E	(R\$ 99.550.000,00 ; R\$ 99.575.000,00]
F	(R\$ 99.575.000,00 ; R\$ 99.600.000,00]

¹⁷ Melhor solução inteira possível sem se importar com as restrições.

De acordo com a Figura 3.3, 62% das estratégias encontraram-se na categoria D, com um Valor Total do Projeto (VTP) variando entre 99,78% e 99,80% do valor obtido pela solução ótima. Outras duas categorias que se destacaram foram a A e a E, com aproximadamente 16% das soluções obtidas em cada categoria. Como resultado, 78% das estratégias executadas retornaram soluções com VTP's variando entre 99,78% e 99,82% do valor obtido pela solução ótima (classes D e E). As classes de cada estratégia, de acordo com os seus valores de alfa, beta e *PesoConec* encontram-se na Tabela 3.2.

Figura 3.3 – Histograma dos VTP's das estratégias executadas

Aparentemente, o parâmetro que mais afetou o resultado do VTP encontrado pelas diferentes estratégias foi o *PesoConec*, resultando em soluções de baixo VTP estratégias onde o *PesoConec* foi igual a 100, e maior variabilidade das soluções obtidas nas estratégias onde o valor do parâmetro foi igual ou superior a 7000. As estratégias cujo valor do *PesoConec* variou entre 600 e 3000 apresentaram soluções de boa qualidade e baixa variabilidade, especialmente as estratégias com *PesoConec* igual a 1100 e valores de alfa iguais ou superiores a 50. Esse resultado vai ao encontro da proposta de que é necessário equilibrar os valores dos déficits das diferentes restrições a serem consideradas no problema, de modo a melhorar a eficácia do algoritmo de busca da heurística.

O parâmetro alfa não apresenta uma tendência em termos de qualidade da solução obtida, mas aparentemente a variabilidade das soluções foi influenciada, podendo-se

observar uma redução da variabilidade do VTP das soluções obtidas com o aumento do valor do parâmetro alfa, especialmente quando observamos dois grupos de estratégias, aquelas com alfa menor ou igual a 30 e as que foram executadas com valores de alfa entre 50 e 70, especialmente quando apresentaram valores de *PesoConec* maiores ou iguais a 7000.

Tabela 3.2 – Definição das classes das soluções de acordo com o seu VTP

Alfa	Beta	Peso Conectividade						
		100	600	1100	3000	7000	11000	15000
10	3	A	D	D	D	E	B	A
10	6	A	E	D	D	D	E	D
10	9	A	D	D	D	F	E	C
10	12	A	D	D	D	E	E	E
10	15	A	E	D	D	E	D	E
30	3	A	D	D	D	C	E	A
30	6	A	D	E	D	C	D	D
30	9	A	D	D	D	C	D	D
30	12	A	D	D	D	C	D	D
30	15	A	D	D	D	C	D	D
50	3	A	D	E	D	D	A	D
50	6	A	D	E	D	D	D	D
50	9	A	D	E	D	D	D	D
50	12	A	D	E	D	D	D	D
50	15	A	D	E	D	D	D	D
70	3	A	D	E	D	D	D	D
70	6	A	D	E	D	D	D	D
70	9	A	D	E	D	D	D	D
70	12	A	D	E	D	D	D	D
70	15	A	D	E	D	D	D	D

Já o parâmetro beta não evidenciou nenhuma tendência em particular na Tabela 3.2, mas ao se considerar as médias dos VTP's das estratégias com mesmos valores de alfa e beta, o único valor de beta que apresenta uma tendência de alta do valor médio do VTP com o aumento do valor de alfa são as estratégias com beta igual a 3, os demais valores não apresentaram tendências bem definidas. Esses resultados podem

ser observados na Figura 3.4, onde também fica evidente a redução da variabilidade do VTP das soluções obtidas pelas estratégias com maiores valores de alfa.

Figura 3.4 – Histograma das médias dos VTP's das estratégias executadas

Com relação a quantidade de iterações realizadas pela heurística para obter as soluções de cada estratégia, os números em geral foram bastante reduzidos, variando de 38 a 101 iterações, com uma média de 13 segundos para executar cada iteração. A cada iteração, a heurística realiza a análise de toda a vizinhança da solução atual, sendo composta aproximadamente por 12.900 soluções vizinhas. O histograma contendo a frequência absoluta do número de soluções em classes de números de iterações pode ser observado na Figura 3.5.

Nessa Figura, percebe-se que 69% das estratégias implementadas encontraram uma boa solução viável com menos de cinquenta iterações, e que 94% das soluções foram obtidas com até 64 iterações, sendo que a melhor solução foi encontrada após 55 iterações da heurística.

Ao observar, na Figura 3.6, a dispersão dos valores obtidos para o VTP das soluções em relação ao número de iterações necessárias para a sua obtenção, nenhuma tendência fica evidente, uma vez que são encontrados valores altos e baixos para quase toda amplitude de iterações.

Figura 3.5 – Histograma do número de iterações das estratégias executadas

Figura 3.6 – Dispersão dos VTP's das soluções em função do número de iterações

Visando a apresentação da formação dos corredores de conectividade pelas soluções propostas pela heurística, os mapas dos quatro primeiros períodos de planejamento foram elaborados para a melhor solução obtida, podendo ser observados na Figura 3.7. Nesses mapas é possível observar que a solução proposta pela heurística obteve sucesso na formação dos corredores de conectividade. A imposição de uma produção mínima de 180.000 m³/ano e de uma produção máxima de 250.000 m³/ano também foi atendida para os dezoito anos do horizonte de planejamento, conforme é possível observar na Figura 3.8.

Figura 3.7 – Mapas dos quatro primeiros períodos do plano de manejo resultante da melhor solução encontrada pela heurística da *RazaoR*

Figura 3.8 – Fluxo anual de produção de madeira obtido pela estratégia com maior VTP encontrada pela heurística da *RazaoR*

De uma forma geral, a heurística da *RazaoR* mostrou-se uma estratégia bastante eficaz para resolução de problemas de otimização do planejamento florestal com restrições de conectividade, uma vez que todas as soluções encontradas apresentaram valores superiores a 99% do valor da função objetivo encontrada na solução ótima; sendo também eficiente no número de iterações necessárias para encontrar boas soluções viáveis para o estudo de caso proposto. A heurística deixou a desejar, na forma como foi implementada, apenas na questão de eficiência em termos de tempo de execução, tendo apresentado um esforço computacional muito superior aquele executado pelo modelo matemático de programação linear inteira mista.

O tempo reduzido para o modelo matemático encontrar a solução ótima, e o baixo número de iterações necessárias para a heurística encontrar boas soluções viáveis deve-se a relativa facilidade para o modelo proposto atender as restrições impostas no problema. Essa relativa facilidade é consequência da união de duas principais características presentes no modelo.

A primeira é o elevado número de regimes de manejo com os quais o modelo matemático e a heurística podem trabalhar para encontrarem soluções. Esse elevado número de regimes facilita ao modelo encontrar soluções que atendam as restrições propostas no problema, uma vez que são dadas maiores opções ao algoritmo. O elevado número de regimes é resultado da forma como foi elaborado o gerador de matrizes do problema, considerando a alternância entre ciclos na formação dos regimes de manejo.

A distribuição e localização das unidades de manejo e dos fragmentos a serem conectados, aliados com o grafo proposto e a facilidade para que as unidades de manejo apresentem-se aptas a fazer parte do corredor constituem a segunda característica que facilita o atendimento das restrições do problema, particularmente para a formação dos corredores. Os fragmentos de vegetação nativa da fazenda considerada no estudo de caso permeiam a matriz do plantio de eucalipto, e como se considerou que a elaboração de um caminho entre dois fragmentos foi suficiente para o estabelecimento de um corredor de conectividade, não foi difícil para a heurística encontrar soluções viáveis, e para o modelo matemático encontrar a solução ótima.

Embora a heurística tenha apresentado um desempenho inferior, em termos de tempo de execução, ao modelo matemático, essa comparação não deve ser considerada definitiva, principalmente devido à implementação do algoritmo da heurística não ter sido realizada com o enfoque em velocidade de execução, restando boas possibilidades para a melhoria da performance da heurística.

Além disso, o estudo de caso constituiu em uma única fazenda de uma empresa florestal, que mesmo possuindo tamanho e número de unidades de manejo suficientes para avaliarmos a aplicabilidade das técnicas propostas para a implementação dos corredores de conectividade em problemas de escala real, ainda constitui uma área pequena quando comparada à área total média que as empresas florestais de grande porte necessitam trabalhar no planejamento estratégico do manejo de suas florestas. Para esses casos, modelos matemáticos de programação linear inteira mista podem não ser capazes de obter soluções viáveis em um tempo computacionalmente aceitável, sendo papel da ciência elaborar e testar métodos alternativos, como a heurística da *RazaoR*, para resolver os problemas de otimização com os quais os gestores florestais se deparam atualmente ou possam vir a se deparar em um futuro próximo.

4.4 Conclusões

O algoritmo recursivo utilizando na programação dinâmica mostrou-se um bom método para a avaliação do déficit de conectividade para as soluções propostas, se adequando perfeitamente à estratégia de busca utilizada pela heurística da *RazaoR* após a inserção do parâmetro de ponderação entre o déficit de conectividade e o déficit de produção.

A heurística mostrou-se eficaz na obtenção de boas soluções viáveis com um baixo número de iterações. Além disso, a sua performance, em termos do tempo de execução do algoritmo, pode ser melhorada com a alteração da linguagem e do código de programação, além da criação de um programa executável para a sua execução. Isso reduziria o tempo para a obtenção de soluções viáveis, possibilitando utilizar a heurística para resolução de problemas de maior porte.

Para estudos futuros recomenda-se o desenvolvimento ou a implementação de outros algoritmos que possam ser utilizados para calcular o déficit de conectividade das soluções avaliadas, especialmente aqueles que permitam o uso de arcos bi-direcionados no grafo que representa os possíveis caminhos para a formação dos corredores de conectividade.

Outra linha de pesquisa sugerida é a elaboração de formas mais eficientes para avaliar a vizinhança da heurística, se concentrando em uma vizinhança parcial que contivesse as melhores alternativas a serem consideradas, de modo a reduzir o tempo de execução de cada iteração da heurística, com conseqüente redução do tempo necessário para que o algoritmo encontrasse soluções viáveis.

Formas de alterar a estratégia de busca para que a heurística pudesse escapar de pontos de ótimo locais e continuar a pesquisa em outras regiões do espaço de soluções consistiria em uma terceira linha que poderia ser seguida em estudos futuros.

A heurística da RazaoR proposta nesse trabalho ainda pode ser utilizada por gestores florestais que não disponham dos softwares necessários para resolução de problemas de programação linear inteira mista em larga escala, especialmente considerando a formação de corredores de conectividade.

Referências

- AUGUSTI, J.C.; FERRAZ, F.F.de; Ferraz, S.F.de; Silva, J.F.da; Camargo, S.L. Cultivo integrado com florestas naturais de baixo impacto. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v.4, p. 62-65, dez 2005.
- ARRUDA, M.B. Corredores ecológicos do brasil – gestão integrada de ecossistemas. In: ARRUDA, M.B.; NOGUEIRA, L.F.S. **Corredores ecológicos**: uma abordagem integradora de ecossistemas no Brasil. Brasília: IBAMA, 2004. p. 11-46.
- BEIER, P; NOSS, R.F. Do habitat corridors provide connectivity? **Conservation Biology**, Oxford, v. 12, n. 6, p. 1241-1252, Dec 1998.
- BORGES, J.G.; HOGANSON, H.M. Assessing the impact of management unit design and adjacency constraints on forestwide spatial conditions and timber revenues. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 29, n. 11, p. 1764-1774, 1999.
- CARO, F.; CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; WEINTRAUB, A. A 2-Opt Tabu Search Procedure for the Multiperiod Forest Harvesting Problem with Adjacency, Greenup, Old Growth, and Even Flow Constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 49, n. 5, p. 738-750, Oct 2003.
- CERDEIRA, J.O. GASTON, K.J.; PINTO, L.S. Connectivity in priority area selection for conservation. **Enviromental Modelling and Assessment**, Amsterdam, v.10, n. 3, 2005. Disponível em:
<<http://www.springerlink.com/w10077.dotlib.com.br/content/u8654v14736176qr/?p=63fe7f7fc01248718f567fdf10eefbf2&pi=2>>. Acesso em: 15 jun 2006.
- DAVIS, L.S.; JOHNSON, K.N.; BETTIGER,P.; HOWARD, T.E. **Forest management: to sustain ecological, economic, and social values**. 4th ed.. Long Grove:Waveland Press, 2005. 804p .
- DALTON, S. **Excel add-in development in C/C++** : applications in finance. West Sussex: John Wiley, 2005. 403p.
- FALCÃO, A.O.; BORGES, J. Combining random and systematic search heuristic procedures for solving spatially constrained forest management scheduling models. **Forest Science**, Bethesda, v. 48, n. 3, p. 608-620, Aug 2002.
- FONSECA, G.A.B.; ALGER, K.; PINTO, L.P.; ARAÚJO, M.; CAVALCANTI, R. Corredores de Biodiversidade: O Corredor Central da Mata Atlântica. In: ARRUDA, M.B.; NOGUEIRA, L.F.S. **Corredores ecológicos**: uma abordagem integradora de ecossistemas no Brasil. Brasília: IBAMA, 2004. p. 47-66.

FULLER, T.; SARKAR, S. LQGraph: A software package for optimizing connectivity in conservation planning. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 21, n. 5, p. 750-755, May 2006.

GARCIA, J.N.; BORTOLLETO JÚNIOR, G. Otimização da matéria-prima “árvore” deve ser prioridade. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 4, p. 92-96, jul – dez 2005.

GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A.T.; BARAHONA, F.; EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A. Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions: Exploring Exact Approaches. **Operations Research**, Cambridge, v. 53, n. 3, p. 490-500, May-Jun 2005.

HILLIER, F.S; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to operations research**. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 1061 p.

HOGANSON, H.M.; BORGES, J.G. Using dynamic programming and overlapping subproblems to address adjacency in large harvest scheduling problems. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n. 4, p. 526-538, Nov 1998.

HORSKINS, K.; MATHER, P.B.; WILSON, J.C. Corridors and connectivity: when use and function do not equate. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 21, n. 5, Jul 2006.

Disponível em:

<<http://www.springerlink.com.w10077.dotlib.com.br/content/84qg533865702442/fulltext.pdf>>. Acesso em: 20 nov 2006.

INFORMATIVO CEPEA – SETOR FLORESTAL. Piracicaba, n. 59, nov 2006. 4 p.

Disponível em : <<http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/inform59.pdf>>. Acesso em: 20 dez 2006.

LOCKWOOD, C.; MOORE, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, n. 3, p. 468-478, Mar 1993.

LOEHLE, C. Optimizing wildlife habitat mitigation with a habitat defragmentation algorithm. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.120, p. 245-251, 1999.

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

MAURER, S.B.; RALSTON, A. **Discrete algorithmic mathematics**. 3rd ed. Wellesley: A K Peters, 2004. 772 p.

McDILL, M.E.; BRAZE, J. Comparing adjacency constraint formulations for randomly generated forest planning problems with four age-class distributions. **Forest Science**, Bethesda, v. 46, n. 3, p. 423-436, Aug 2000.

McDILL, M.E.; BRAZE, J. Using the branch and bound algorithm to solve forest planning problems with adjacency constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, n. 3, p. 403-418, Aug 2001.

McDILL, M.E.; REBAIN, S.A.; BRAZE, J. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 48, n. 4, p. 631-642, Nov 2002.

MEYER, W. B.; TURNER II, B. L. **Changes in land use and land cover: a global perspective**. New York: Cambridge University Press, 1994. 537 p.

MURRAY, A.T. Spatial Restrictions in Harvest Scheduling. **Forest Science**, Bethesda, v. 45, n. 1, p. 45-52, Feb 1999.

NOBRE, S.R. **A heurística da Razão-R aplicada a problemas de gestão florestal**. 1999.129 p. Dissertação (Mestrado em Administração Rural) – Universidade Federal de Lavras, 1999.

NOBRE, S.R.; RODRIGUEZ, L.C.E. Analysis and evaluation of the R-Ratio heuristic for forest scheduling. BEVERS, MICHAEL; BARRETT, TARA M.(Comp.): In: SYMPOSIUM SYSTEMS ANALYSIS IN FOREST RESOURCES; 2003. Stevenson, Oct 7-9, Stevenson, WA. Portland, OR: USDA Forest Service, 2005. p. 287-295. **USDA Forest Service – General Technical Report PNW-GTR-000**

ÖHMAN, K. Creating continuous areas of old forest in long-term forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 11, p. 1817-1823, Nov 2000.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L.O. The core area concept in forming contiguous areas for long-term forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 28, n. 7, p. 1032-1039, Jul 1998.

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**, Amsterdam, v. 161, n. 1-3, p. 221-230, May 2002.

ÖNAL, H.; BRIERS, R.A. Designing a conservation reserve network with minimal fragmentation: A linear integer programming approach. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v. 10, n. 3, Sep 2005. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/k1q2527g368u043g/fulltext.pdf>>. Acesso em: 16 set 2006.

REBAIN, S.; McDILL, M.E. A mixed-integer formulation of the minimum patch size problem. **Forest Science**, Bethesda, v. 49, n. 4, p. 608-618, Aug 2003.

RODRIGUEZ, L.C.E. **Use of heuristic methods in the analysis of large-scale forest management integer programming models**. 1994. 93p. Tesis (Doctor of Philosophy in Forest Management and Biometrics) – University of Georgia, Athens. 1994.

SESSIONS, J. Solving for habitat connections as a steiner network problem. **Forest Science**, Bethesda, v. 38, n. 1, p.203-207, Feb 1992.

SUSTAINABLE FORESTRY INITIATIVE: 2005 – 2009 Standard. Sustainable Forestry Board (SFB) and American Forest & Paper Association (AF&PA), 2005. 27 p. Disponível em: <<http://www.aboutsfb.org/generalPDFs/SFBStandard2005-2009.pdf>>. Acesso em: 15 nov 2006.

WEINTRAUB, A.; BAHARONA, F.; EPSTEIN, R. A Column Generation Algorithm for Solving General Forest Planning Problems with Adjacency Constraints. **Forest Science**, Bethesda, v. 40, n. 1, p. 142-161, Feb 1994.

WILLIAMS, J.C. Delineating protected wildlife corridors with multi-objective programming. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v. 3, n. 1/2, p. 77-86, Mar 1998.

WINSTON, W.L. **Operations Research**: Applications and Algorithms. 4th ed. Canada: THOMSON Brooks/Cole, 2004. 1434p.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados utilizados para a elaboração dos coeficientes do problema da Fazenda Empresarial

Tabela 1 – Custos anuais de manejo da floresta, por hectare, discriminados para a primeira e segunda rotação.

Rotação	Idade (anos)	Custo Anual (R\$/ha)	Rotação	Idade (anos)	Custo Anual (R\$/ha)
1	0	2.149,41	2	0	601,83
1	1	99,00	2	1	99,00
1	2	92,00	2	2	994,75
1	3	269,00	2	3	269,00
1	4	269,00	2	4	269,00
1	5	269,00	2	5	269,00
1	6	32,00	2	6	32,00
1	7	32,00	2	7	32,00
1	8	32,00	2	8	32,00
1	9	32,00	2	9	32,00
1	10	32,00	2	10	32,00
1	11	32,00	2	11	32,00
1	12	32,00	2	12	32,00
1	13	32,00	2	13	32,00
1	14	32,00	2	14	32,00
1	15	32,00	2	15	32,00
1	16	32,00	2	16	32,00
1	17	32,00	2	17	32,00
1	18	32,00	2	18	32,00
1	19	32,00	2	19	32,00
1	20	32,00	2	20	32,00
1	21	32,00	2	21	32,00
1	22	32,00	2	22	32,00
1	23	32,00	2	23	32,00

Tabela 2 – Tabela de produção utilizada para determinação da prognose da volume colhido de madeira para celulose e para energia dos talhões da Fazenda Empresarial, discriminados para a primeira e segunda rotação

(continua)					
Índice de Produtividade	Idade (anos)	Rotação 1		Rotação 2	
		Volume de Celulosa (m ³ /ha)	Volume de Energia (m ³ /ha)	Volume de Celulosa (m ³ /ha)	Volume de Energia (m ³ /ha)
1	0	0	0	0	0
1	1	46,9	4,4	40,1	3,7
1	2	73,9	6,9	61,5	5,7
1	3	109,6	11,7	109,6	10,2
1	4	189,4	12,5	148,8	9,8
1	5	240,4	10,6	205,4	9
1	6	262,1	8,1	252,2	7,8
1	7	333,2	18,7	287,8	16,1
1	8	353,3	14,1	323,4	12,9
1	9	381,8	15,3	354,2	14,2
1	10	399,5	16	380,8	15,2
1	11	414,6	16,6	404,1	16,2
1	12	427,7	17,1	424,8	17
1	13	439	17,6	443	17,7
1	14	449	18	459,3	18,4
1	15	457,8	18,3	473,9	19
1	16	457,8	18,3	473,9	19
1	17	457,8	18,3	473,9	19
1	18	457,8	18,3	473,9	19
1	19	457,8	18,3	473,9	19
1	20	457,8	18,3	473,9	19
1	21	457,8	18,3	473,9	19
1	22	457,8	18,3	473,9	19
1	23	457,8	18,3	473,9	19
3	0	0	0	0	0
3	1	46,9	4,4	34,2	3,2
3	2	81,7	7,6	55,9	5,2
3	3	124,9	11,6	65,1	6,1
3	4	186,2	12,3	126,8	8,4
3	5	240,5	10,6	175,5	7,7
3	6	291,1	9	220,9	6,8
3	7	328,2	18,4	266,6	14,9
3	8	355,1	14,2	296,5	11,9
3	9	378,3	15,1	326,6	13,1
3	10	399,5	16	354,3	14,2
3	11	417,8	16,7	378,6	15,1
3	12	433,7	17,3	400,3	16
3	13	447,6	17,9	419,5	16,8
3	14	459,9	18,4	436,8	17,5
3	15	470,9	18,8	452,4	18,1
3	16	470,9	18,8	452,4	18,1
3	17	470,9	18,8	452,4	18,1

Tabela 2 – Tabela de produção utilizada para determinação da prognose da volume colhido de madeira para celulose e para energia dos talhões da Fazenda Empresarial, discriminados para a primeira e segunda rotação

(continuação)					
Índice de Produtividade	Idade (anos)	Rotação 1		Rotação 2	
		Volume de Celulosa (m ³ /ha)	Volume de Energia (m ³ /ha)	Volume de Celulosa (m ³ /ha)	Volume de Energia (m ³ /ha)
3	18	470,9	18,8	452,4	18,1
3	19	470,9	18,8	452,4	18,1
3	20	470,9	18,8	452,4	18,1
3	21	470,9	18,8	452,4	18,1
3	22	470,9	18,8	452,4	18,1
3	23	470,9	18,8	452,4	18,1
4	0	0	0	0	0
4	1	47,2	4,4	35,6	3,3
4	2	77,1	7,2	57,7	5,4
4	3	122,4	11,4	82,8	7,7
4	4	188,1	12,4	124,6	8,2
4	5	242	10,6	182,5	8
4	6	285,6	8,9	230,2	7,1
4	7	316,6	17,7	254,7	14,3
4	8	345,8	13,8	291,7	11,7
4	9	371,1	14,8	315,6	12,6
4	10	392,7	15,7	343,6	13,7
4	11	411,3	16,5	368,3	14,7
4	12	427,4	17,1	390,2	15,6
4	13	441,6	17,7	409,9	16,4
4	14	454,2	18,2	427,6	17,1
4	15	465,3	18,6	443,4	17,7
4	16	465,3	18,6	443,4	17,7
4	17	465,3	18,6	443,4	17,7
4	18	465,3	18,6	443,4	17,7
4	19	465,3	18,6	443,4	17,7
4	20	465,3	18,6	443,4	17,7
4	21	465,3	18,6	443,4	17,7
4	22	465,3	18,6	443,4	17,7
4	23	465,3	18,6	443,4	17,7
6	0	0	0	0	0
6	1	50,8	4,7	37,6	3,5
6	2	76,6	7,1	65,4	6,1
6	3	130,4	12,1	105,8	9,8
6	4	195,2	12,9	144,2	9,5
6	5	260,4	11,5	193,1	8,5
6	6	283	8,8	261,2	8,1
6	7	347,9	19,5	278,7	15,6
6	8	356,3	14,3	316,2	12,6
6	9	381,5	15,3	349	14
6	10	401,6	16,1	377,6	15,1
6	11	419	16,8	402,8	16,1
6	12	433,9	17,4	425	17

Tabela 2 – Tabela de produção utilizada para determinação da prognose da volume colhido de madeira para celulose e para energia dos talhões da Fazenda Empresarial, discriminados para a primeira e segunda rotação

Índice de Produtividade	Idade (anos)	(conclusão)			
		Rotação 1		Rotação 2	
		Volume de Celulosa (m ³ /ha)	Volume de Energia (m ³ /ha)	Volume de Celulosa (m ³ /ha)	Volume de Energia (m ³ /ha)
6	13	447,2	17,9	444,9	17,8
6	14	458,8	18,4	462,6	18,5
6	15	469,2	18,8	478,5	19,1
6	16	469,2	18,8	478,5	19,1
6	17	469,2	18,8	478,5	19,1
6	18	469,2	18,8	478,5	19,1
6	19	469,2	18,8	478,5	19,1
6	20	469,2	18,8	478,5	19,1
6	21	469,2	18,8	478,5	19,1
6	22	469,2	18,8	478,5	19,1
6	23	469,2	18,8	478,5	19,1
8	0	0	0	0	0
8	1	45,6	4,2	37,3	3,5
8	2	76,6	7,1	60,2	5,6
8	3	117,5	10,9	74,9	7
8	4	187,3	12,4	134,3	8,9
8	5	234	10,3	191,3	8,4
8	6	279,2	8,7	238,1	7,4
8	7	312,9	17,5	280,3	15,7
8	8	339	13,6	317,1	12,7
8	9	360,6	14,4	349,8	14
8	10	380,9	15,2	379,4	15,2
8	11	398,3	15,9	405,5	16,2
8	12	413,5	16,5	428,5	17,1
8	13	426,8	17,1	449,2	18
8	14	438,5	17,5	467,6	18,7
8	15	449	18	484,2	19,4
8	16	449	18	484,2	19,4
8	17	449	18	484,2	19,4
8	18	449	18	484,2	19,4
8	19	449	18	484,2	19,4
8	20	449	18	484,2	19,4
8	21	449	18	484,2	19,4
8	22	449	18	484,2	19,4
8	23	449	18	484,2	19,4

Tabela 3 – Dados das Unidades de Manejo no ano zero do horizonte de planejamento

(continua)

Unidade de Manejo (UM)	Índice de Produtividade	Condição das UM no ano zero			Área (ha)
		Ciclo	Rotação	Idade	
A003	4	3	1	7	38,03
A004	4	3	1	8	48,46
A005	4	4	1	1	41,06
A006	4	3	1	7	47,09
A007	4	3	1	7	29,12
A008	4	3	1	7	30,40
A013	4	3	1	7	39,57
A014	4	3	1	7	44,38
A019	4	3	1	7	32,34
A020	8	3	1	7	38,16
A021	4	3	1	7	28,05
A023	4	3	2	3	28,90
A025	4	4	1	1	41,34
A026	4	4	1	1	35,67
A027	4	3	2	2	36,44
A028	1	2	2	7	39,69
A029	4	2	2	7	40,19
A030	4	3	1	2	27,82
A031	1	2	1	9	18,08
A032	4	3	1	3	42,04
A033	6	2	1	9	41,26
A034	6	3	1	5	39,77
A035	6	2	1	9	43,94
A036	6	2	2	7	17,38
A041	4	4	1	5	43,29
A042	4	4	1	3	15,71
A045	4	4	1	3	43,09
A058	4	3	1	2	36,09
A059	4	3	1	5	42,39
A060	4	4	1	3	40,61
A061	8	4	1	4	46,82
A062	8	3	1	5	47,97
A072	8	3	2	6	36,75
A073	8	4	1	3	40,08
A074	8	3	1	2	48,69
A077	3	3	1	2	45,62
A078	3	3	1	5	19,37
A080	3	3	1	3	43,16
A081	8	4	1	4	31,29
A082	4	4	1	4	26,27
A083	8	4	1	3	48,77
A096	8	4	1	4	49,83
A097	4	3	1	4	35,41
A098	4	3	1	4	44,29
A099	4	3	1	4	45,96
A100	4	3	1	6	49,83

Tabela 3 – Dados das Unidades de Manejo no ano zero do horizonte de planejamento

Unidade de Manejo (UM)	Índice de Produtividade	Condição das UM no ano zero			Área (ha)
		Ciclo	Rotação	Idade	
A101	8	3	1	6	40,97
A102	4	3	1	4	34,57
A105	8	3	1	4	31,41
A106	8	3	1	5	47,22
A107	8	3	1	2	42,41
A108	8	3	1	5	35,36
A109	8	3	1	4	29,22
A110	8	3	1	5	36,77
A112	8	2	1	22	9,66
A114	8	3	1	2	30,09
A117	8	2	2	8	34,37
A118	8	2	2	8	44,62
A119	8	2	2	8	49,01
A120	8	2	2	9	42,73
A121	8	2	2	8	55,91
A201	4	4	1	2	55,09
A206	4	4	1	1	95,49
A208	4	4	1	1	55,44
A209	4	4	1	1	82,35
A212	8	4	1	2	68,19
A222	8	3	1	5	81,78
A223	8	3	1	5	82,67
A226	4	3	1	2	89,82
A227	8	4	1	4	55,90
A228	4	3	1	3	51,57
A229	4	4	1	3	104,89
A230	4	3	1	5	54,87
A231	4	3	1	5	64,02
A232	4	3	1	6	57,05
A237	4	3	1	5	96,63
A238	4	3	1	3	78,82
A239	4	4	1	3	55,33
A244	8	3	1	3	39,69
A250	4	4	1	1	71,21
A251	4	3	2	2	89,38
A252	4	4	1	1	57,83
A253	4	3	1	4	68,32
A254	4	3	1	6	59,61
A260	8	3	1	2	49,69
A267	8	4	1	2	71,90
A270	8	4	1	4	52,33
A273	8	3	1	5	112,54
A274	8	4	1	3	49,62
A275	8	4	1	3	54,12
A276	8	4	1	2	98,14

APÊNDICE B – Dados utilizados para a elaboração dos coeficientes do problema do Parque Estadual Anhanguera

Tabela 4 – Dados das Unidades de Manejo no ano zero do horizonte de planejamento.

Unidade de Manejo	Área (ha)	Unidade de Manejo	Área (ha)	Unidade de Manejo	Área (ha)
01	4,12	25	8,81	50	11,29
02	1,28	26	8,49	51	8,59
03	9,82	27	10,14	52	10,17
04	5,87	28	9,77	53	11,00
05	9,44	29	1,51	54	11,38
06	11,38	30	11,29	55	11,00
07	10,50	31	11,13	56	0,82
08	11,05	32	10,30	57	1,62
09	8,31	33	3,42	58	11,18
10	5,95	34	11,13	59	9,51
11	9,23	35	4,80	60	9,46
12	7,19	36	11,27	61	10,09
13	0,38	37	11,11	62	5,44
14	10,89	38	11,23	63	11,30
15	2,36	39	11,36	64	11,25
16	11,25	40	11,25	65	11,04
17	10,24	42	11,40	66	8,89
18	2,96	43	11,39	67	10,57
19	10,87	44	11,37	68	0,45
20	10,93	45	11,33	69	4,38
21	8,67	46	11,17	70	7,48
22	6,10	47	10,91	71	11,15
23	8,47	48	11,18	72	3,81
24	9,22	49	11,28	73	11,44

Tabela 5 – Tabela de produção utilizada para determinação da prognose do volume colhido de madeira ao se executar o corte dos talhões do Parque Estadual Anhanguera

Unidade de Manejo	Volume produzido no ano de corte (m ³ /ha)	Unidade de Manejo	Volume produzido no ano de corte (m ³ /ha)	Unidade de Manejo	Volume produzido no ano de corte (m ³ /ha)
01	495,28	25	492,79	50	447,35
02	495,28	26	440,97	51	497,47
03	495,28	27	483,56	52	449,84
04	494,09	28	505,80	53	439,20
05	495,28	29	439,20	54	439,20
06	495,28	30	439,20	55	495,28
07	495,28	31	439,20	56	447,46
08	495,28	32	439,20	57	447,46
09	495,28	33	439,20	58	447,46
10	355,05	34	439,20	59	447,46
11	354,54	35	440,34	60	447,46
12	424,39	36	447,46	61	447,46
13	354,54	37	447,46	62	447,46
14	354,54	38	447,33	63	505,80
15	354,54	39	445,23	64	505,80
16	354,54	40	439,47	65	505,80
17	384,34	42	447,46	66	458,44
18	459,42	43	445,58	67	505,80
19	505,80	44	440,87	68	505,80
20	505,80	45	441,16	69	496,25
21	450,31	46	439,20	70	447,46
22	505,80	47	439,20	71	447,46
23	461,47	48	440,06	72	451,35
24	495,28	49	447,09	73	495,28

APÊNDICES

APÊNDICE C – Modelo matemático da Fazenda Empresarial, com conectividade, implementado na linguagem do GAMS

```

sets
i Unidades de manejo
j Prescricao
t Período
p Produtos
a arcos
e regimes associados a cada unidade de manejo;
*Parametros
parameter c(i,j) coeficiente da funcao objetivo
parameter area(i) area da unidade de manejo i
parameter v(i,j,p,t) producao volumetrica
parameter vmin(p,t) piso de producao
parameter vmax(p,t) teto de producao
parameters d(i) fluxo liquido em cada no
parameter b(i,j,t) capacidade de participar do corredor
parameter rf(i,j,t) presenca ou ausencia de reforma
parameter ct(i,j,t) custo na UM i submetida a prescricao j no periodo t
*Chamando arquivo de dados
$CALL GDXXRW.EXE C:\trabalho\Dados.xls Index=leitura!a3
$GDXIN Dados.gdx
$LOAD i j t p a e c area v b vmin vmax d rf ct
$GDXIN
alias(i,ip);
*Declarando as variáveis
variables
z          valor da funcao objetivo
vol(p,t)   volume do produto p colhido no ano t
x(i,j)     unidade de manejo i sob a prescricao j
nos(i,t)   existencia do no i no periodo t
totref(t)  area total reformada no periodo t
totorc(t)  orcamento total gasto no periodo t
arco(i,i,t) arco positivo da unidade de manejo i para ip no periodo t
positive variables vol(p,t), totref(t), totorc(t),nos(i,t), arco(i,i,t);
binary variables x(i,j);
*Impondo bounds aos arcos
arco.up(i,ip,t) = 3;
*Declarando as equacoes
equations
obj
produ(p,t)
prodmin(p,t)
prodmax(p,t)
exclu(i)
reforma(t)

```

```

orcamento(t)
exno(i,t)
exarco(i,t)
fluxo(i,t);
* Valor da funcao objetivo
obj .. z =E= sum(e(i,j),c(e)*area(i)*x(e));
* Apenas um regime de manejo por unidade de manejo
exclu(i) .. sum(e(i,j),x(e)) =E= 1;
* Existencia dos nos para conectividade em cada ano
exno(i,t) .. sum(e(i,j),b(e,t)*x(e)) =G= nos(i,t);
* Permite a passagem apenas se o no existir
exarco(i,t) .. sum(a(ip,i),arco(a,t))+sum(a(i,ip),arco(a,t)) =L= 6*nos(i,t);
* Caminho formado pela conectividade
fluxo(i,t) .. sum(a(ip,i),arco(a,t))-sum(a(i,ip),arco(a,t)) =E= d(i);
* Endogena para contabilizacao da producao anual
produ(p,t) .. sum(e(i,j),v(e,p,t)*area(i)*x(e)) =E= vol(p,t);
* Piso anual de producao
prodmin(p,t) .. vol(p,t) =G= vmin(p,t);
* Teto anual de producao
prodmax(p,t) .. vol(p,t) =L= vmax(p,t);
* Endogena para contabilizacao da area reformada anual
reforma(t) .. sum(e(i,j),rf(e,t)*area(i)*x(e)) =E= totref(t);
* Endogena para contabilizacao do orcamento anual utilizado
orcamento(t) .. sum(e(i,j),ct(e,t)*area(i)*x(e)) =E= totorc(t);
MODEL C_CONEC /all/;
* Resolvendo o modelo gerado com conectividade.
C_CONEC.OptFile = 1;
SOLVE C_CONEC USING MIP maximizing Z;
execute_unload "Dados_c_conec.gdx",z,x,arco,vol,totref,totorc;
execute 'gdxxrw.exe Dados_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Dados_c_conec.xls var=totorc
rng=orcamento!A1:ZZ5000 rdim=1';
execute 'gdxxrw.exe Dados_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Dados_c_conec.xls var=totref
rng=reforma!A1:ZZ5000 rdim=1';
execute 'gdxxrw.exe Dados_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Dados_c_conec.xls var=vol
rng=volume!A1:ZZ5000 rdim=2';
execute 'gdxxrw.exe Dados_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Dados_c_conec.xls var=arco
rng=arco!A1:ZZ5000 rdim=2 cdim=1';
execute 'gdxxrw.exe Dados_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Dados_c_conec.xls var=x
rng=Resposta!A1:ZZ5000 rdim=2';
execute 'gdxxrw.exe Dados_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Dados_c_conec.xls var=Z
rng=FuncObj!A1';

```

APÊNDICE D – Modelo matemático da Fazenda Empresarial, sem conectividade, implementado na linguagem do GAMS

```

sets
i Unidades de manejo
j Prescricao
t Periodo
p Produtos
e regimes associados a cada unidade de manejo;
*Parametros
parameter c(i,j) coeficiente da funcao objetivo
parameter area(i) area da unidade de manejo i
parameter v(i,j,p,t) producao volumetrica
parameter vmin(p,t) piso de producao
parameter vmax(p,t) teto de producao
parameter rf(i,j,t) presenca ou ausencia de reforma
parameter ct(i,j,t) custo na UM i submetida a prescricao j no periodo t
*Chamando arquivo de dados
$CALL GDXXRW.EXE C:\trabalho\DadosSemConec.xls Index=leitura!a3
$GDXIN DadosSemConec.gdx
$LOAD i j t p e c area v vmin vmax rf ct
$GDXIN
*Declarando as variaveis
variables
z          valor da funcao objetivo
vol(p,t)   volume do produto p colhido no ano t
x(i,j)     unidade de manejo i sob a prescricao j
nos(i,t)   existencia do no i no periodo t
totref(t)  area total reformada no periodo t
totorc(t)  orcamento total gasto no periodo t
positive variables vol(p,t), totref(t), totorc(t);
binary variables x(i,j);
*Declarando as equacoes
equations
obj
produ(p,t)
prodmin(p,t)
prodmax(p,t)
exclu(i)
reforma(t)
orcamento(t);
* Valor da funcao objetivo
obj .. z =E= sum(e(i,j),c(e)*area(i)*x(e));
* Apenas um regime de manejo por unidade de manejo
exclu(i) .. sum(e(i,j),x(e)) =E= 1;
* Endogena para contabilizacao da producao anual

```

```

produ(p,t) .. sum(e(i,j),v(e,p,t)*area(i)*x(e)) =E= vol(p,t);
* Piso anual de producao
prodmin(p,t) .. vol(p,t) =G= vmin(p,t);
* Teto anual de producao
prodmax(p,t) .. vol(p,t) =L= vmax(p,t);
* Endogena para contabilizacao da area reformada anual
reforma(t) .. sum(e(i,j),rf(e,t)*area(i)*x(e)) =E= totref(t);
* Endogena para contabilizacao do orcamento anual utilizado
orcamento(t) .. sum(e(i,j),ct(e,t)*area(i)*x(e)) =E= totorc(t);

```

MODEL S_CONEC /all/;

* Resolvendo o modelo gerado sem a conectividade.

S_CONEC.OptFile = 1;

SOLVE S_CONEC USING MIP maximizing Z;

execute_unload "DadosSemConec_c_conec.gdx",z,x,arco,vol,totref,totorc;

```
execute                                'gdxxrw.exe                                DadosSemConec_c_conec.gdx
```

```
    O=C:\trabalho\DadosSemConec_c_conec.xls var=totorc rng=orcamento!A1:ZZ5000 rdim=1';
```

```
execute                                'gdxxrw.exe                                DadosSemConec_c_conec.gdx
```

```
    O=C:\trabalho\DadosSemConec_c_conec.xls var=totref rng=reforma!A1:ZZ5000 rdim=1';
```

```
execute                                'gdxxrw.exe                                DadosSemConec_c_conec.gdx
```

```
    O=C:\trabalho\DadosSemConec_c_conec.xls var=vol rng=volume!A1:ZZ5000 rdim=2';
```

```
execute                                'gdxxrw.exe                                DadosSemConec_c_conec.gdx
```

```
    O=C:\trabalho\DadosSemConec_c_conec.xls   var=arco   rng=arco!A1:ZZ5000   rdim=2
    cdim=1';
```

```
execute                                'gdxxrw.exe                                DadosSemConec_c_conec.gdx
```

```
    O=C:\trabalho\DadosSemConec_c_conec.xls var=x rng=Resposta!A1:ZZ5000 rdim=2';
```

```
execute                                'gdxxrw.exe                                DadosSemConec_c_conec.gdx
```

```
    O=C:\trabalho\DadosSemConec_c_conec.xls var=Z rng=FuncObj!A1';
```

APÊNDICE E – Modelo matemático do Parque Estadual Anhanguera, com conectividade, implementado na linguagem do GAMS

```

sets
i Unidades de manejo
j Prescricao
t Periodo
a arcos
e regimes associados a cada unidade de manejo;
* Parametros
parameter c(i) coeficiente da funcao objetivo
parameter v(i,j,t) producao volumetrica
parameter vmin(t) piso de producao
parameter vmax(t) teto de producao
parameters d(i) fluxo liquido em cada no;
parameter b(i,j,t) capacidade de participar do corredor
*Chamando arquivo de dados
$CALL GDXXRW.EXE C:\trabalho\Anhanguera.xls Index=leitura!a3
$GDXIN Anhanguera.gdx
$LOAD i j t a e c v vmin vmax d b
$GDXIN
display a;
display e;
display vmax;
alias(i,ip);
* Declarando as variaveis
variables
z          valor da funcao objetivo
vol(t)     volume do produto p colhido no ano t
x(i,j)     unidade de manejo i sob a prescricao j
nos(i,t)   existencia do no i no periodo t
arco(i,i,t) arco positivo da unidade de manejo i para ip no periodo t
positive variables vol(t), nos(i,t), arco(i,i,t);
binary variables x(i,j);
*bounds dos arcos
arco.up(i,ip,t) = 3;
* Declarando as equacoes
equations
obj
produ(t)
prodmin(t)
prodmax(t)
exclu(i)
exno(i,t)
exarco(i,t)
fluxo(i,t);

```



```

* Valor da funcao objetivo
obj .. z =E= sum(e(i,j),c(i)*x(e));
* Endogena para contabilizacao da producao anual
produ(t) .. sum(e(i,j),v(e,t)*x(e)) =E= vol(t);
* Piso anual de producao
prodmin(t) .. vol(t) =G= vmin(t);
*Teto anual de producao
prodmax(t) .. vol(t) =L= vmax(t);
* Apenas um regime de manejo por unidade de manejo
exclu(i) .. sum(e(i,j),x(e)) =E= 1;
* Existencia dos nos para conectividade em cada ano
exno(i,t) .. sum(e(i,j),b(e,t)*x(e)) =G= nos(i,t);
* Permite a passagem apenas se o no existir
exarco(i,t) .. sum(a(ip,i),arco(a,t))+sum(a(i,ip),arco(a,t)) =L= 6*nos(i,t);
* Caminho formado pela conectividade
fluxo(i,t) .. sum(a(ip,i),arco(a,t))-sum(a(i,ip),arco(a,t)) =E= d(i);

```

MODEL C_CONEC / all /;

```

* Resolvendo o modelo com conectividade.
SOLVE C_CONEC USING MIP maximizing Z;
execute_unload "Resposta_c_conec.gdx",z,x,arco,vol;
execute 'gdxxrw.exe Resposta_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Resposta_c_conec.xls var=vol
rng=volume!A1:ZZ5000 rdim=1';
execute 'gdxxrw.exe Resposta_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Resposta_c_conec.xls var=arco
rng=arco!A1:ZZ5000 rdim=2 cdim=1';
execute 'gdxxrw.exe Resposta_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Resposta_c_conec.xls var=x
rng=Resposta!A1:ZZ5000 rdim=2';
execute 'gdxxrw.exe Resposta_c_conec.gdx O=C:\trabalho\Resposta_c_conec.xls var=Z
rng=FuncObj!A1';

```

APÊNDICE F – Modelo matemático do Parque Estadual Anhanguera, sem conectividade, implementado na linguagem do GAMS

```

sets
i Unidades de manejo
j Prescricao
t Periodo
a arcos
e regimes associados a cada unidade de manejo;
* Parametros
parameter c(i) coeficiente da funcao objetivo
parameter v(i,j,t) producao volumetrica
parameter vmin(t) piso de producao
parameter vmax(t) teto de producao
parameters d(i) fluxo liquido em cada no;
parameter b(i,j,t) capacidade de participar do corredor
* Chamando arquivo de dados
$CALL GDXXRW.EXE C:\trabalho\Anhanguera.xls Index=leitura!a3
$GDXIN Anhanguera.gdx
$LOAD i j t a e c v vmin vmax d b
$GDXIN
display a;
display e;
display vmax;
alias(i,ip);
* Declarando variaveis
variables
z          valor da funcao objetivo
vol(t)     volume do produto p colhido no ano t
x(i,j)     unidade de manejo i sob a prescricao j
nos(i,t)   existencia do no i no periodo t
positive variables vol(t), nos(i,t);
binary variables x(i,j);
* Declarando as equacoes
equations
obj
produ(t)
prodmin(t)
prodmax(t)
exclu(i);
* Valor da funcao objetivo
obj .. z =E= sum(e(i,j),c(i)*x(e));
* Endogena para contabilizacao da producao anual
produ(t) .. sum(e(i,j),v(e,t)*x(e)) =E= vol(t);
* Piso anual de producao
prodmin(t) .. vol(t) =G= vmin(t);
*Teto anual de producao

```

```
prodmax(t) .. vol(t) =L= vmax(t);
```

```
* Apenas um regime de manejo por unidade de manejo
```

```
exclu(i) .. sum(e(i,j),x(e)) =E= 1;
```

```
MODEL S_CONEC /all/;
```

```
S_CONEC.OptFile = 1;
```

```
SOLVE S_CONEC USING MIP maximizing Z;
```

```
execute_unload "Resposta_s_conec.gdx",z,x,vol;
```

```
execute 'gdxxrw.exe Resposta_s_conec.gdx O=C:\trabalho\Resposta_s_conec.xls var=vol  
rng=volume!A1:ZZ5000 rdim=1';
```

```
execute 'gdxxrw.exe Resposta_s_conec.gdx O=C:\trabalho\Resposta_s_conec.xls var=x  
rng=Resposta!A1:ZZ5000 rdim=2';
```

```
execute 'gdxxrw.exe Resposta_s_conec.gdx O=C:\trabalho\Resposta_s_conec.xls var=Z  
rng=FuncObj!A1';
```

ANEXOS

ANEXO A – Mapas do Plano de Manejo da Fazenda Empresarial resultante do modelo de programação linear inteira mista.

Figura 1 – Mapas do quarto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 2 – Mapas do quinto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 3 – Mapas do sexto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 4 – Mapas do sétimo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 5 – Mapas do oitavo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 6 – Mapas do nono período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 7 – Mapas do décimo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 8 – Mapas do décimo primeiro período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 9 – Mapas do décimo segundo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 10 – Mapas do décimo terceiro período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 11 – Mapas do décimo quarto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 12 – Mapas do décimo quinto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 13 – Mapas do décimo sexto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 14 – Mapas do décimo sétimo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 15 – Mapas do décimo oitavo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

ANEXO B – Mapas do Plano de Manejo do Parque Estadual Anhanguera resultante do modelo de programação linear inteira mista

Figura 16 – Mapas do segundo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 17 – Mapas do terceiro período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 18 – Mapas do quarto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 19 – Mapas do quinto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 20 – Mapas do sexto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 21 – Mapas do sétimo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 22 – Mapas do oitavo período do horizonte de planeamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 23 – Mapas do nono período do horizonte de planeamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 24 – Mapas do décimo período do horizonte de planeamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 25 – Mapas do décimo primeiro período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 26 – Mapas do décimo segundo período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente

Figura 27 – Mapas do décimo quinto período do horizonte de planejamento dos modelos com e sem conectividade, respectivamente