



TAYRINE VIEIRA MARTINS

**CONTROLE ESPACIAL CLONAL EM
MODELOS DE REGULAÇÃO FLORESTAL**

LAVRAS – MG

2016

TAYRINE VIEIRA MARTINS

**CONTROLE ESPACIAL CLONAL EM MODELOS DE REGULAÇÃO
FLORESTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide

Orientador

Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho

Coorientador

LAVRAS- MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Martins, Tayrine Vieira.

Controle espacial clonal em modelos de regulação florestal /
Tayrine Vieira Martins. – Lavras : UFLA, 2016.
79 p. : il.

Dissertação(mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador: Lucas Rezende Gomide.
Bibliografia.

1. Restrição espacial. 2. Tomada de decisão. 3. Planejamento
florestal. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

TAYRINE VIEIRA MARTINS

**CONTROLE ESPACIAL CLONAL EM MODELOS DE REGULAÇÃO
FLORESTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de abril de 2016.

Prof. Dr. Lucas Amaral de Melo UFLA

Prof. Dr. Rafael Rode UFOPA

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide
Orientador

Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho
Coorientador

LAVRAS- MG

2016

À minha mãe Sirlei, minha vizinha Jandira e ao meu noivo Luis Paulo, dedico.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por guiar-me no caminho certo e iluminar minha trajetória. Aos meus pais e familiares. Em especial, à minha mãe Sirlei e minha vó Jandira pela luta constante, confiança e amor incondicional, não teria conseguido nada sem elas. Ao meu noivo e melhor amigo, Luis Paulo, pelo companheirismo, estímulo e paciência. Aos meus avós que estão no céu e orando por mim.

Aos grandes amigos e colegas de laboratório, Nathalia e Matheus, pelos anos de companheirismo nos estudos. À equipe do LEMAF pelo companheirismo, crescimento e aprendizado. Em especial, agradeço à Thiza, Mônica, Rafaella, Paula, Geovanni, Pedro, Aliny, Andressa, Ximena, Gabriela e Inácio pelas conversas, desabafos, risadas, corridas e ensinamentos compartilhados a companhia de vocês foi fundamental para completar essa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Lucas Rezende Gomide, pelo apoio, disposição e ensinamentos. Seu trabalho foi imprescindível para a conclusão desta dissertação. Ao meu Coorientador, Prof. Antônio Carlos Ferraz Filho, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho. Ao Pedro Resende, pela disponibilização dos dados para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Lavras por ser minha casa durante sete anos de jornada universitária.

E a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para que mais esta etapa fosse concluída com sucesso. A todos vocês os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO GERAL

O setor florestal exerce um papel importante para a economia do Brasil. O uso do carvão vegetal por indústrias siderúrgicas desponta como uma alternativa mais sustentável de energia. O setor siderúrgico está intimamente relacionado com o florestal uma vez que o potencial de expansão do primeiro depende do segundo. Desta maneira, um bom planejamento florestal é imprescindível para fornecer informações para a tomada de decisão. Verifica-se que problemas de planejamento florestal envolvem um número elevado de variáveis que torna o exercício de planejamento cada vez mais complexo. Para a resolução desse tipo de problema, a programação matemática dá suporte por meio da Programação Linear Inteira (PLI). Diante disso, objetivou-se, com este trabalho, apresentar uma nova aplicação de restrições espaciais do tipo URM, denominada de restrição de adjacência clonal, que pretende auxiliar na prevenção da proliferação de pragas e doenças em plantios de eucalipto. Esta restrição foi utilizada em modelos de PLI para minimização de custos de produção. Foram consideradas restrições espaciais e não espaciais, volumétricas, áreas de reforma, abandono e não abandono de talhões. Este trabalho foi dividido em dois capítulos: o primeiro apresenta um referencial da atual situação do setor siderúrgico e do problema de planejamento florestal, enquanto o segundo traz a proposta de utilização de uma nova aplicação das restrições espaciais para a silvicultura, denominada de restrição de adjacência clonal. Foram gerados 12 cenários, separados em três diferentes grupos, sem restrições espaciais, com restrições URM para colheita e para adjacência clonal. Todos os grupos tiveram, ainda, restrições volumétricas, limite de área a ser reformada e de abandono ou não de talhões. O volume médio colhido nos cenários sem restrição espacial (grupo 1) foi 0,64% maior em relação àqueles com restrições espaciais (grupo 2 e 3). Nos cenários em que houve restrição de porcentagem de área de reforma houve diferenças significativas nos custos. A elaboração dos mapas de resultados evidenciou, na matriz paisagística, a eficiência da aplicação das restrições espaciais. A aplicação da restrição de adjacência clonal mostrou-se melhor que a URM colheita. Os cenários que utilizaram a aplicação da restrição de adjacência clonal ficaram, em média, 0,14% maior, se comparado aos cenários do planejamento tradicional (grupo 1), comprovando a viabilidade de sua aplicação para o objetivo proposto.

Palavras-chave: Restrição espacial. Tomada de decisão. Planejamento florestal.

GENERAL ABSTRACT

The forestry sector plays an important role to Brazilian economy. The use of charcoal by steel mill industries has increased as a more sustainable alternative of energy. The steel sector is closely related to the forest since the expansion potential of the first depends on the second. This way, a good forest planning is necessary for supplying information to decision-making. It is known that forest planning problems have a high number of variables that make the planning process increasingly complex. Mathematical programming helps in the resolution of this kind of problem by means of Integer Linear Programming (ILP). So, this study aimed to introduce a new application of space restrictions of URM type, also named restriction of clonal adjacency, which intends to help in preventing the proliferation of pests and diseases in eucalyptus plantations . This restriction was used in ILP models to the minimization of production costs. Space and non-space, volumetric, reform areas, abandonment and non-abandonment of stands restrictions were considered in this study. This research was shared in two chapter: the first one presents a reference about the current situation of steel sector and the forest planning problem, while the second one proposes the utilization of a new application of space restrictions in Silviculture, named restriction of clonal adjacency. Twelve separated scenarios were generated in three different groups, without restrictions, with URM restrictions and clonal adjacency restriction. All groups had yet volumetric, limit of area to be reformed and abandonment or non-abandonment of stands restrictions. Average volume harvested in the scenarios without restriction (group 1) was 0.64% higher in relation to that with space restrictions (group 2 and 3). In scenarios with restriction of reform area percentage had significant differences in the costs. The elaboration of result maps presented, in landscape matrix, the efficiency of space restrictions application. The application of clonal adjacency restriction showed be better than URM harvest. The scenarios that used the application of clonal adjacency restriction were, on average, 0.14% higher when compared to traditional planning scenarios (group 1), proving the viability of its application to the proposed objective.

Key words: Space restriction. Steel. Decision making. Forest planning.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	9
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Motivação e Justificativa.....	10
1.2 Objetivo geral.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Setor siderúrgico brasileiro	13
2.2 Carvão vegetal e sustentabilidade	17
2.3 Planejamento Florestal.....	23
2.4 Planejamento florestal espacial.....	25
2.5 Desafios do setor florestal	26
2.6 Modelos e métodos de resolução	27
2.7 Pragas e doenças florestais.....	29
3 CONSIDERAÇÕES GERAIS	33
REFERÊNCIAS	35
SEGUNDA PARTE	43
ARTIGO 1 - ESPACIALIZAÇÃO SILVICULTURAL ÓTIMA DE CLONES DE EUCALIPTO E SEUS EFEITOS ECONÔMICOS NO PLANEJAMENTO FLORESTAL	43
1 INTRODUÇÃO	45
2 MATERIAL E MÉTODOS	49
2.1 O problema florestal e área de estudo	49
2.2 Análise econômica e condução florestal.....	50
2.3 Programação matemática e análise comparativa dos cenários.....	51
3 RESULTADOS	57
4 DISCUSSÃO	65
5 CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	73

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O aumento constante do consumo mundial de energia, baseada em combustíveis fósseis, dirigiu a humanidade para uma matriz energética insegura, cara e, principalmente, prejudicial para o meio ambiente. Por causa disso, muitos países consideram a necessidade de profundas mudanças, incluindo a intensificação do aproveitamento de outras fontes energéticas, especialmente, as renováveis que incluem a madeira. O uso da madeira como fonte de energia vem se tornando uma alternativa de energia ambientalmente mais saudável, o que a potencializa como alternativa aos combustíveis fósseis, conduzindo o seu uso à diminuição das emissões dos gases do efeito estufa (BRITO, 2007).

E é nesse contexto que se insere a utilização do carvão vegetal como fonte energética, principalmente, nas indústrias siderúrgicas que utilizam essa fonte como insumo indispensável para produção de determinados tipos de aço, como o ferro gusa.

O potencial de expansão do setor siderúrgico sustentável está fortemente vinculado à base florestal. Desta forma, é necessária uma boa gestão das florestas no âmbito econômico, social e ambiental. O planejamento florestal é imprescindível para obtenção de informações com qualidade e rapidez gerando o sucesso das tomadas de decisão no manejo florestal.

É observado que os problemas de planejamento florestal envolvem um número elevado de variáveis. A quantidade excessiva das variáveis de decisão dos modelos, somadas à escolha de um modelo de planejamento não adequado, na maioria dos casos, pode comprometer o êxito de um projeto florestal. O gestor florestal está, frequentemente, interessado em uma produção sustentável de bens, que atenda às especificações e demandas de mercado, que atenda às restrições de capital e operacional, garantido um emprego regular da mão de

obra e apresente um custo mínimo ou um retorno máximo dentro de um horizonte de planejamento (TEIXEIRA, 2002).

Hoje, há uma maior consciência da importância do padrão paisagístico sobre as funções ecológicas das florestas (por exemplo, habitat da vida selvagem, da biodiversidade, recreação, conservação de água). Estas preocupações exigem novos desenvolvimentos em planejamento florestal, os problemas, agora, envolvem informação espacial (BORGES; EID; BERGSENG, 2014). Bettinger e Sessions (2003) acreditam que, brevemente, o planejamento florestal será chamado de planejamento florestal espacial, tendo como foco as atividades do manejo florestal e políticas ambientais.

O planejamento é dependente do uso de métodos e técnicas da ciência gerencial, que permitem avaliar situações alternativas, analisar os resultados e reduzir riscos e incertezas na tomada de decisão. A utilização dessas técnicas propicia melhoria na alocação de recursos produtivos, aumentando a rentabilidade econômica das empresas (SILVA JÚNIOR, 1993).

A Pesquisa Operacional (PO) destaca-se entre essas técnicas gerenciais, a qual se pode encontrar em aplicações em quase todas as áreas da atividade humana (HILLIER; LIEBERMAN, 1998). A programação linear (PL), programação linear inteira (PLI), programação linear inteira mista (PLIM) são algumas das técnicas de PO aplicadas ao manejo florestal.

1.1 Motivação e Justificativa

O setor florestal é de fundamental importância para a economia de diversos países. No Brasil, a participação do setor de florestas, plantadas no PIB (Produto Interno Bruto), vem aumentando e fechou, no ano de 2014, com 1,1%, enquanto no PIB Industrial sua participação foi de 5,5% (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2015).

Portanto, para que o setor florestal continue crescendo, é necessário que grandes problemas do setor sejam solucionados ou melhorados. A pesquisa operacional é uma das ferramentas que pode contribuir para a resolução de diversos problemas florestais. É verificado que o negócio florestal enfrenta diversos problemas quanto à tomada de decisão, incluindo o planejamento em seus três níveis, operacional, tático e estratégico. Segundo Rönnqvist et al. (2015), alguns deles são problemas que lidam com o sequenciamento da colheita, construção de estradas e ramais, regulamentação ambiental, múltiplos produtos florestais, para atender diferentes demandas, transporte, integração da cadeia de abastecimento.

Percebe-se que, atualmente, há uma maior consciência da importância do aspecto paisagístico da floresta em relação a suas funções ecológicas. Dong et al. (2015) afirmam que essas preocupações exigem que haja novos desenvolvimentos no planejamento florestal tradicional com a inserção de informações espaciais.

No que diz respeito a pragas e doenças, esse problema tem se agravado na eucaliptocultura. Segundo Camargo et al. (2014), o motivo é o aumento de áreas plantadas de eucalipto, que tem como destino produção de celulose e carvão vegetal. Furtado, Santos e Masson (2008) e Junghans (2000) acreditam que o avanço dos plantios de eucalipto, para regiões mais quentes e úmidas, juntamente com a utilização repetitiva de uma mesma área para plantio e uso de espécies mais susceptíveis, auxiliaram para a criação de condições favoráveis à ocorrência de doenças.

Por outro lado, a alta produtividade de genótipos mais resistentes a pragas e doenças vem sendo selecionados. No entanto, esses esforços, ainda, não são suficientes para extinguir, totalmente, o ataque de pragas e doenças em plantios comerciais. Segundo Harwood (2011), estes danos podem reduzir as taxas de produção final ou levá-los à destruição total das plantações, levando a

danos econômicos. Uma opção a ser testada condiz com a construção de um arranjo espacial entre clones, durante a seleção dos talhões a serem plantados, permitindo assegurar a construção de barreiras artificiais à proliferação desses patógenos nocivos ao plantio. Uma forma segura de introduzir e garantir respostas ótimas está vinculada à construção de restrições espaciais do tipo URM, no modelo de regulação florestal.

1.2 Objetivo geral

Objetivou-se, com este trabalho, apresentar uma nova aplicação de restrições espaciais do tipo URM, denominada de restrição de adjacência clonal, em um modelo de minimização de custos de produção, baseado na programação linear inteira. Esta restrição tem o intuito de controlar o plantio de um mesmo material genético em áreas contíguas. E, desta forma, poder atuar como medida preventiva na proliferação de pragas e doenças, auxiliando na tomada de decisão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Setor siderúrgico brasileiro

A indústria siderúrgica brasileira teve grande incentivo na década de 40 com a criação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), que foi um dos traços marcantes do esforço de industrialização do país.

Atualmente a indústria siderúrgica é essencial para o Brasil, à medida que é o alicerce de várias cadeias produtivas, podendo-se citar: a automotiva, a da construção civil e a de bens de capital (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010). Ainda, algumas companhias siderúrgicas brasileiras possuem investimentos no exterior.

Segundo análise econômica do Banco Itaú (2015a), o Brasil ocupou a nona posição no ranking da produção de aço, com cerca de 34,2 milhões de toneladas produzidas, em 2013, o equivalente a 2,1% da produção mundial. Com relação ao consumo aparente (produção interna somada às importações, subtraindo as exportações), o País, também, ocupa a nona colocação, com 29,4 milhões de toneladas ou 1,8% do total mundial. Tais fatos colocam o Brasil em uma posição estratégica dentro do cenário mundial. No entanto, em relação à América do Sul, o País desponta como o principal destaque do setor, com 74,6% do total produzido e 56,9% do total consumido no continente. A Tabela 1 mostra a posição de destaque do Brasil frente a outros países da América Latina na produção de aço bruto.

Tabela 1 - Produção de Aço Bruto na América Latina (Unidade 10³ t)

País	2009	2010	2011	2012	2013	2014*
Brasil	26.506	32.948	35.220	34.524	34.163	33.897
México	13.957	16.710	18.110	18.095	18.208	18.995
Argentina	4.050	5.138	5.611	5.170	5.273	5.488
Venezuela	3.808	2.207	2.980	2.359	2.179	1.485
Colômbia	1.052	1.180	1.287	1.302	1.236	1.208
Chile	1.308	1.011	1.615	1.670	1.323	1.079
Peru	718	876	877	981	1.069	1.078
Equador	259	357	436	425	570	662
Cuba	267	278	282	277	322	256
Uruguai	62	65	80	77	91	94
Total	52.733	61.544	67.544	65.889	65.556	65.396

* Dados preliminares

Fonte Adaptado Instituto Aço Brasil (2015)

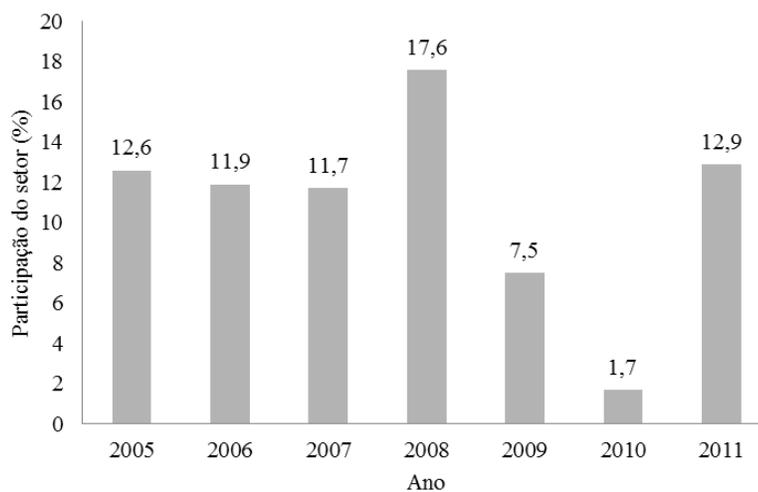
A mesma análise mostra a distribuição da demanda de aço no Brasil por setores, sendo o principal a construção civil que, em 2013, respondeu por 36,7% da demanda siderúrgica no País. O setor automotivo segue em segundo lugar, com 22,2%, seguido pelo setor de bens de capital, com 20,5%.

A indústria siderúrgica e o mercado do carvão vegetal estão muito vulneráveis às instabilidades da economia mundial. A crise de 2008 atingiu a siderurgia, principalmente, no momento em que afetou as indústrias de construção civil e automobilística. Esse setor industrial demonstrou forte queda nas vendas neste período. Outro aspecto, ligado ao mercado externo, é que cerca de 30% das vendas dos produtores de aço e 60% das vendas dos produtos de ferro-gusa são dirigidos à exportação (LOFTI, 2010). A análise do Banco Itaú (2015a) evidencia que os Estados Unidos são o principal destino das exportações brasileiras de aço com 29% do total, em média. Em seguida, ficam Argentina e Holanda, ambas com 8%, e China, com 6%.

A World Steel Association afirma que o consumo aparente de produtos de aço, no Brasil, teve forte expansão entre 2006 e 2008, crescendo 29,7% no período, já, para 2009, em função da crise internacional, houve retração, recuperando-se em 2010. No entanto, entre 2010 e 2013 o consumo aparente, praticamente, ficou estável, com crescimento médio de 0,4 % no período.

Em 2012, foram produzidos cerca de 35,5 milhões de toneladas de aço e o setor foi responsável por 4% do PIB do país. Em 2011, a indústria do aço foi responsável por 12,9% do superávit da balança comercial brasileira, equivalente a US\$ 3,8 bilhões, sendo maior que o ano anterior (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013). Na Figura 1 é possível acompanhar o histórico de participação do setor siderúrgico na economia brasileira. Observa-se uma queda, nos anos de 2009 e 2010, reflexo da crise econômica de 2008. Em 2011 a participação do setor siderúrgico volta a crescer.

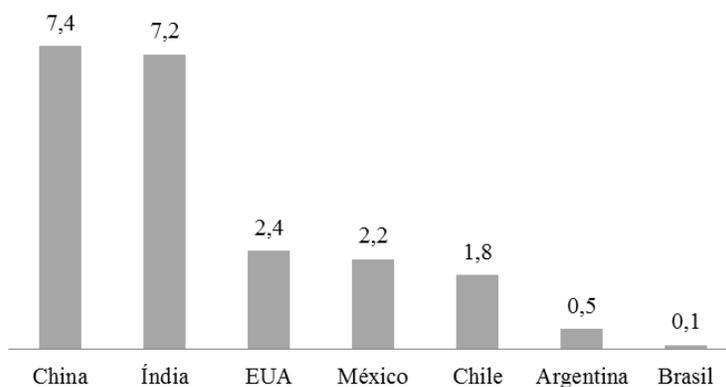
Figura 1 - Participação da indústria de aço na balança comercial brasileira.



Fonte Instituto Aço Brasil (2013)

A economia brasileira cresceu apenas 0,1% em 2014, registrando o pior resultado entre as principais economias do mundo (Figura 2). A soma das riquezas, produzidas no ano de 2014, chegou a R\$ 5,52 trilhões e o PIB per capita caiu a R\$ 27,2 mil. Esse foi o pior resultado, desde 2009, ano da crise internacional, quando a economia recuou 0,2%. Em 2013, a economia havia crescido 2,7% (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2015).

Figura 2 - Variação do PIB por país.



Fonte Indústria Brasileira de Árvores (2015)

Atualmente, o Brasil sofre uma grande crise, com a qual há queda de poder de compra e confiança do consumidor, juros elevados e comprometimento de renda. Ainda, o setor de construção civil tem seu crescimento desacelerado, iniciado no ano de 2015. A produção de veículos, ao longo do ano de 2014, apresentou forte recuo e, com isso, a venda de aço tende a cair.

O setor siderúrgico enfrenta um panorama desfavorável. O índice de confiança dos empresários de metalurgia atingiu os níveis mais baixos, desde a crise de 2008. Segundo levantamento, realizado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o setor siderúrgico no Brasil recebeu cerca de R\$ 38 bilhões em investimentos entre 2009 e 2012. No entanto,

para o período de 2014 a 2017, o banco estima que o setor vá receber R\$ 16 bilhões, o que representa uma queda de 57,9% na intenção de investimentos. Segundo o Banco Itaú (2015a), essa queda é reflexo tanto da desaceleração econômica, quanto do baixo nível de confiança dos empresários na retomada do crescimento do setor.

A análise econômica do Banco Itaú (2015a) mostra que a redução da participação brasileira, no comércio siderúrgico internacional, está relacionada a fatores domésticos e externos. Do lado doméstico, a desaceleração do crescimento econômico interno, principalmente, do setor industrial levou a uma menor demanda por aço no País. Já, do lado externo, a queda da demanda foi impulsionada pelo baixo crescimento dos países importadores de aço do Brasil, como Estados Unidos e Argentina e pela desaceleração do crescimento da China, que levou ao excesso de oferta e à queda do preço do metal no mercado internacional.

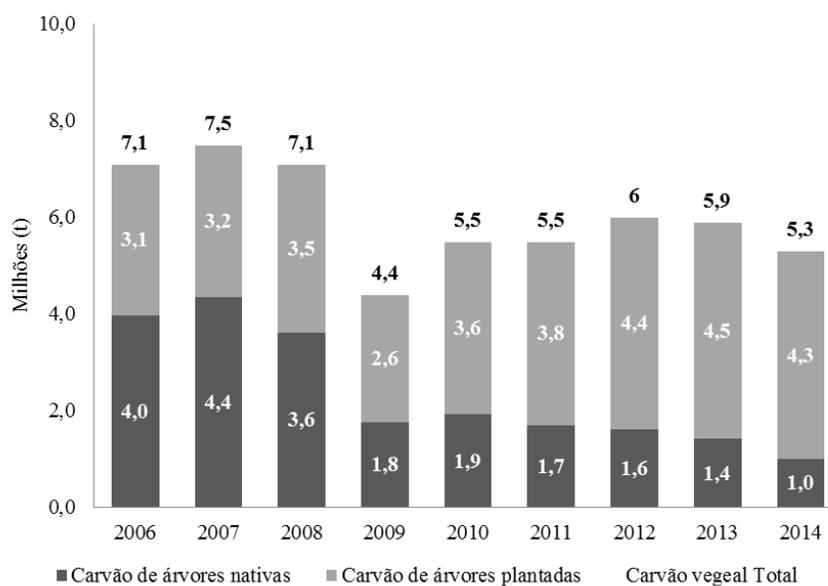
2.2 Carvão vegetal e sustentabilidade

No Brasil, a madeira destinada para energia é utilizada, na produção de carvão vegetal, no consumo residencial, industrial e agropecuário. No consumo de madeira para energia, a produção de carvão destaca-se em decorrência da demanda existente, pelo produto junto ao setor siderúrgico. Segundo Brito (2007), o Brasil é o maior produtor mundial de aço produzido com o emprego do carvão vegetal para fins de redução do minério de ferro.

A indústria brasileira tem como base um modelo exportador, influenciado pelas *commodities* e pela larga utilização de produtos provenientes de recursos naturais. Isso gera, em determinados momentos, instabilidade tanto na economia global quanto na economia doméstica, em razão das depreciações da taxa de câmbio, desvalorização do real e aumento de vendas desses produtos.

O mercado do carvão vegetal e a economia mundial são interligados. Seu consumo, exclusivamente de florestas plantadas, vem apresentando comportamento diferente, no setor de Siderurgia, ao longo dos últimos anos, o qual vem caindo. Segundo IBÁ (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2015), o carvão vegetal é um dos redutores energéticos mais importantes da indústria siderúrgica nacional. Em 2014, o consumo de carvão vegetal, no Brasil, alcançou 5,30 milhões de toneladas, com 81% de participação de madeira oriunda de árvores plantadas (Figura 3). Esse percentual representa 4,3 milhões de toneladas, 4% menor do que a produção de 2013.

Figura 3 - Consumo nacional de carvão vegetal, 2006-2014.



Fonte Adaptado de Indústria Brasileira de Árvores (2015)

O aumento do consumo de carvão vegetal oriundo de florestas plantadas, observado a partir de 2009, decorreu de vários fatores, dentre eles, a pressão e exigências, por parte dos grandes consumidores nacionais e

internacionais de ferro-gusa, para redução ou até eliminação da utilização de carvão de áreas nativas, além das exigências ambientais nacionais, cada vez mais intensas e rígidas, por meio de leis e regulamentos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, 2013).

A despeito do aumento do consumo de carvão vegetal de florestas plantadas, os desafios persistem como a valorização do “ferro gusa verde” e o desenvolvimento de ações de divulgação das suas qualidades e contribuição, na geração de serviços ambientais, como na redução de emissões de gases de efeito estufa.

O estado de Minas Gerais vem reduzindo o consumo de carvão oriundo de florestas nativas. De acordo com o Instituto Estadual de Florestas (IEF), órgão que integra o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA), em 2011, apenas 4,4% do total de carvão vegetal produzido e consumido no estado tinha origem em florestas nativas. A Lei Florestal 18.365/2009, que alterou a legislação florestal no Estado, fixou a redução progressiva do consumo legal de produtos ou subprodutos originados da vegetação nativa, em especial o carvão vegetal. Essa lei estabelece que o consumo de produtos e subprodutos florestais de matas nativas não deverá ser maior do que 5%, a partir de 2018. A legislação anterior permitia que as indústrias suprissem toda a sua demanda por matéria-prima com produtos florestais de mata nativa, desde que houvesse reposição florestal.

A lei florestal estadual prevê cronograma de redução do consumo de produtos da vegetação nativa. Até 2013, as indústrias deveriam utilizar, no máximo, 15% de produtos procedentes dessas florestas. De 2014 a 2017, o máximo permitido é de 10%. As novas empresas que se instalarem no estado de Minas Gerais serão obrigadas a comprovar que seu consumo é de 95% de matéria prima proveniente de florestas plantadas (IEF, 2012).

A Secretaria do Desenvolvimento da Produção, do MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior), em parceria com o CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos), elaborou o estudo “Modernização da Produção de Carvão Vegetal - Subsídios ao Plano Setorial de Redução das Emissões da Siderurgia”. O estudo tem como objetivos principais: promover a redução das emissões de CO₂ (dióxido de carbono); evitar o desmatamento de floresta nativa e incrementar a competitividade brasileira da indústria de ferro e aço no contexto da economia de baixo carbono. Como consequência, tem-se a busca pela redução das emissões de CO₂, aprovada na Lei 12.187, de 29 de novembro de 2009, que instituiu a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC) vinculada ao Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Algumas projeções para 2020 foram feitas nesse estudo tais como: projeção de estudo de mercado para produção de ferro - gusa a carvão vegetal de 2014 a 2020 (Tabela 2).

Tabela 2 - Projetos para a produção de ferro - gusa a carvão vegetal, em milhões de toneladas.

Anos	Siderúrgicas	Mercado interno	Exportação	Total Geral	Projeção
2013	2,3	2,8	2,7	7,8	-
2014	2,5	3	3,5	9	8,2
2015	2,8	3,7	3,8	10,3	8,6
2016	3,2	3,7	4	10,9	9
2017	3,3	4,1	4,3	11,7	9,5
2018	3,3	4,5	4,5	12,3	10
2019	3,3	4,9	5,4	13,6	10,5
2020	3,3	5,2	6,3	14,8	11

Fonte D'Avila Filho (2014) e Scherer (2014)

O mercado interno terá um consumo de 5,2 toneladas em 2020, enquanto para a exportação será de 6,3 toneladas de carvão vegetal.

Conforme estudos das projeções de produção de gusa a carvão vegetal, para 2020, valores mais otimistas elevaram os 7,8 milhões de toneladas, em 2013, para 14,8 milhões de toneladas, em 2020 (D'AVILA FILHO, 2014), enquanto para valores mais conservadores, utilizou-se um crescimento linear de 5% ao ano, chegando a 11 milhões de toneladas para 2020 (SCHERER, 2014). O estudo, ainda, mostrou quais as projeções para produção de ferro - gusa, produção necessária de carvão vegetal e madeira, estoque de florestas plantadas e necessidade de uso de florestas nativas de 2014 a 2020 (Tabela 3).

A projeção é de que haja uma produção de 11 milhões de toneladas de carvão vegetal no ano de 2020 (dados da massa total). Para que isso seja possível, é necessário que o total da produção de carvão vegetal, pela linha de base, esteja em torno de 8,1 milhões de toneladas. Desta forma, a quantidade de madeira necessária, para suprir essa demanda, será de 30 milhões de toneladas. Há, ainda, metas para reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE), mais precisamente do CO₂. Para 2020, esta meta é de reduzir até 13,87 milhões de toneladas de emissão desse gás.

Tabela 3 - Projeção de redução de emissões de CO₂ e quantidade de florestas destinada à produção de carvão vegetal para o período de 2014 a 2020.

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Produção projetada de ferro - gusa	Usinas integradas e produção independente*	8,2	8,6	9	9,5	10	10,5	11
Produção necessária de carvão vegetal	Usinas integradas e produção independente*	6,1	6,3	6,6	6,9	7,1	7,4	7,7
Madeira necessária	Usinas integradas e produção independente*	22,4	23	23,6	23,4	23,3	23,7	24
Estoques de florestas plantadas	Usinas integradas e produção independente*	15,1	16	17,2	17,5	17,5	17,7	17,8
Necessidade de uso de florestas nativas	Nativas*	7,3	6,9	6,3	5,9	5,8	6	6,2
	% de Nativas **	32	30	27	25	25	25	26
Redução das emissões de CO ₂	Anual*	0	0,32	0,64	1,68	2,82	3,72	4,7
	Acumulada*	0	0,32	0,96	2,64	5,46	9,18	13,88

* Milhões de toneladas ** % em massa

Fonte Adaptado de Raad e Melo (2014)

Conforme já observado na Figura 3, houve um déficit de florestas plantadas, para a produção de carvão vegetal, de 2013 a 2014. Esse número pode ser, ainda, maior em 2020, o que implicará o uso de maiores áreas de florestas nativas para suprir a demanda do setor. Projeta-se para esse período a necessidade de uso de 41% em massa de florestas nativas.

Com base no estudo, observou-se que o gargalo, para reduzir o uso das florestas nativas, é a soma de itens como melhoria da produtividade dos povoamentos florestais e maior eficiência no processo de carbonização da madeira. Vale salientar que o bom planejamento florestal é essencial, em que a maior eficiência da conversão da madeira em carvão vegetal auxilia na redução

de gases do efeito estufa, proporcionando, assim, uma produção mais sustentável no sentido produtivo e ecológico.

Para que a cadeia produtiva do carvão vegetal mantenha competitividade com setores como os de produtos naturais ou de origem fóssil, é necessária uma análise ampla de sua sustentabilidade. Isso é importante, para países exportadores de produtos florestais, tal como é o Brasil, pois, sem essa análise, torna-se difícil a aceitação dos produtos pelos países importadores.

No contexto de sustentabilidade, tem-se o aumento do interesse na substituição de combustíveis fósseis por fontes de energias alternativas e de menor impacto ambiental (SIMIONI; HOEFLICH, 2010). Essa pressão mercadológica crescente leva à procura pelo carvão vegetal, dito sustentável, como fonte de energia renovável (SILVA et al., 2007).

2.3 Planejamento Florestal

Para lidar com o planejamento florestal, ele é, normalmente, dividido em uma estrutura hierárquica, com os níveis: estratégico, tático e operacional (DAVIS et al., 2000). No mais alto nível de planejamento, o foco está em metas de longo prazo, como metas de volumes de colheita e estratégias de regeneração. Estes resultados são, então, transferidos para os níveis de planejamento que operam em horizontes de tempo mais curtos. A localização dos locais de colheita tem sido, essencialmente, uma prerrogativa do nível tático da hierarquia de planejamento (BOSTON; BETTINGER, 2001; CEA; JOFRÉ 2000; CHURCH; MURRAY; BARBER, 2000; COVINGTON et al., 1988; GUSTAFSSON et al., 2000; JAMNICK; WALTERS, 1993, NELSON; SESSIONS, 1991; RICHARDS; GUNN 2000).

Segundo Baeteman e Snell (1998), os três níveis hierárquicos podem ser assim definidos:

- a) Planejamento florestal estratégico- é a tomada de decisões de objetivos e estratégias em longo prazo. Esses objetivos compreendem os alvos principais ou resultados que estão associados à sobrevivência e crescimento da organização;
- b) Planejamento florestal tático- está assentado nos objetivos e planos do planejamento estratégico, os quais, por sua vez, são retratados de maneira mais específica. Neste nível, é dada ênfase às principais ações a serem executadas por cada unidade da empresa cumprindo suas partes no plano estratégico;
- c) Planejamento florestal operacional- embasado nos resultados do planejamento tático, possui a atribuição de identificar os procedimentos e processos específicos, requisitados aos níveis inferiores da organização, concentrando esforços nas tarefas cotidianas em um curto horizonte de tempo.

Em decorrência da complexidade e da necessidade de maiores informações, sobre a gestão do negócio florestal, foram desenvolvidas ferramentas para facilitar a tomada de decisão. As ferramentas de planejamento florestal possibilitam distinguir, com base em múltiplos objetivos, as melhores opções de manejo, permitindo dinâmica e flexibilidade na tomada de decisões (VAN DEUSEN, 1999).

Gomide (2009), de maneira mais ampla, afirma que o planejamento florestal está voltado, para definir metas de produção com períodos definidos, levando em consideração preço e demandas do mercado, recursos disponíveis e estoques.

2.4 Planejamento florestal espacial

O planejamento espacial identifica e expõe os componentes da paisagem, auxiliando em uma tomada de decisão mais consciente sobre os aspectos ecológicos do ecossistema. Neste ponto, algumas restrições são introduzidas no modelo matemático para permitir esta ação. Áreas de conexão entre fragmentos, distância entre blocos explorados, distribuição de estradas são alguns exemplos de restrições (GOMIDE, 2009).

Segundo Basken e Keles (2005), a diferença entre o planejamento florestal tradicional e o espacial é o fato de como analisar o talhão dentro da floresta. No planejamento tradicional, o talhão é apenas uma unidade de produção desconectada dos demais talhões, já, no planejamento espacial, passa-se a observar o tamanho, forma e distribuição do talhão dentro da floresta. Neste caso, o controle de seus efeitos sobre o ecossistema é determinado, espacialmente, por meio de restrições formuladas exclusivamente, para o planejamento florestal espacial, podendo-se citar restrição de adjacência do tipo URM (*unit restriction model*) e do tipo ARM (*area restriction model*).

Gomide (2009) afirma que as restrições de adjacência do tipo URM impedem o corte de talhões adjacentes, na floresta, no mesmo período de tempo, sendo de fácil aplicação e mais difundida entre os planejadores florestais. Este tipo de restrição é considerado muito rígido, uma vez que não considera a área dos talhões envolvidos para o corte. Silva (2004) declara que há uma desvantagem nesse tipo de restrição, associada ao elevado número de inequações desenvolvidas para retratar todo o problema.

As restrições de adjacência do tipo ARM, ao contrário do apresentado anteriormente, permitem o corte de talhões vizinhos, desde que não ultrapassem o limite máximo de área permitido. As restrições desta natureza são mais flexíveis na questão da adjacência, uma vez que não basta serem apenas vizinhos

para não serem cortados simultaneamente; eles devem ser analisados como um conjunto formado por áreas contínuas (GOMIDE, 2009).

Murray et al. (2000) ressalta que o desafio é encontrar uma maneira de formular, linearmente, este tipo de restrição, pois em virtude das características não lineares, a sua formulação torna-se impossível via programação linear inteira. A alternativa, para os métodos exatos, é o uso de procedimentos de aproximação (meta-heurísticas) que, apesar do grau de dificuldade na implementação, permitem encontrar soluções viáveis com base em funções de penalidade.

2.5 Desafios do setor florestal

O setor florestal vem aumentando sua participação nas economias de diversos países, inclusive, no Brasil. No entanto, para que essa participação continue aumentando, é necessário desenvolver melhor o setor, para otimizar os processos, buscando sempre o aumento de lucro e redução de custos de maneira sustentada e em equilíbrio com questões ecológicas.

A pesquisa operacional é umas das ferramentas que contribui para a resolução de diversos problemas florestais. Nota-se que o negócio florestal enfrenta diversos problemas quanto à tomada de decisão, incluindo o planejamento em seus três níveis: operacional, tático e estratégico.

No trabalho de Rönnqvist et al. (2015), são apresentadas 33 principais lacunas existentes na área florestal que podem ser solucionadas com o auxílio da pesquisa operacional. Alguns delas são:

- a) Agendamento diário da colheita florestal e transporte de madeira. Segundo Caro et al. (2009), modelos que incorporam medidas, para o planejamento de colheita de modo a minimizar a perda associada

de madeira colhida e os custos operacionais diários, têm sido desenvolvidos;

- b) Problemas de como estabelecer impactos ambientais de diferentes práticas operacionais da colheita, definindo modelos para evitar impactos negativos;
- c) Problemas relacionados com o transporte. O transporte é uma parte fundamental dentro do planejamento florestal, estando, muitas vezes, integrado com as operações;
- d) Problemas de modelagem relacionados à integração da colheita com o transporte, construção de estradas, para florestas de grande porte, considerando restrições espaciais.

Os problemas relacionados ao planejamento florestal envolvem um número elevado de variáveis. Essas variáveis podem ser biológicas (potencial de crescimento), sociais (leis ambientais), econômicas (preços e custos de produção da madeira). Na maioria dos casos, as variáveis interagem entre si, nos problemas de planejamento, tornando-os um problema complexo. Diante disso, a pesquisa operacional surge como uma ferramenta fundamental para auxiliar na tomada de decisão do gestor florestal (BUONGIORNO; GILLES, 2003).

2.6 Modelos e métodos de resolução

O uso da pesquisa operacional, na resolução de problemas de planejamento florestal, torna-se cada vez mais constante. Os métodos mais utilizados de resolução são Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira (PLI), Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e Meta-heurísticas.

Alguns desses estudos podem ser encontrados em Borges, Hoganson e Rose (1999), Castro (2007), Falcão e Borges (2002, 2003), Gomide (2009), McDill e Braze (2000, 2001), McDill, Rebain e Braze (2002), Meilby, Strange e

Thorsen (2001), Murray e Church (1996), Rodrigues et al. (2006), Silva et al. (2003), dentre outros.

Grande parte dos trabalhos, envolvendo o planejamento da produção, utiliza modelos de programação linear, conforme classificação por Johnson e Scheurman (1977), como modelos do tipo I e II. A diferença entre esses dois tipos de modelos encontra-se no fato de o modelo II apresentar número reduzido de variáveis de decisão, quando comparado ao modelo I, para um mesmo problema abordado (RODRIGUES et al., 2006).

Leuschner (1990) afirma que modelos de PL são formulados, para maximizar ou minimizar uma função objetivo, a qual, por sua vez, está condicionada a restrições, podendo ser equações ou inequações.

No planejamento florestal, usualmente, os modelos de PL possuem como variável de decisão, a área das unidades de produção (talhões) em que serão conduzidas as alternativas de manejo (BUONGIORNO; GILLES, 1987; DAVIS; JOHNSON, 1987; DYKSTRA, 1984). Esses tipos de modelos são muito utilizados em problemas que envolvem o agendamento da colheita florestal, uma vez que possibilita conhecer mais combinações de corte que proporcionarão maiores receitas (JOHNSON; SCHEURMAN, 1977). Por esse motivo é utilizada em problemas de grande porte.

Baseado no método de resolução via PL, tanto o modelo I quanto o modelo II apresentam uma eficiência computacional comprovada, possuindo flexibilidade na elaboração das restrições. No entanto, não há garantias de se adotar apenas uma única alternativa de manejo, o que, na prática, pode promover problemas operacionais, já que subdivide as unidades de produção, seguindo diferentes regimes de manejo. Para suprir esse fracionamento das unidades de produção, desenvolve-se o problema pelo método da Programação Linear Inteira (PLI).

A diferença existente entre PL e PLI, segundo Silva (2004), encontra-se no tipo de variável de decisão. Na PL as variáveis podem assumir valores contínuos e na PLI as variáveis apresentam valores positivos e inteiros.

Alguns dos métodos de resolução existente de PLI são: *branch-and-bound*, *branch-and-cut*, relaxação *lagrangeana*, *constraint satisfaction*, heurísticas e o método de projeções (eliminação de Fourier-Motzkin). No entanto, o método mais popular é o mecanismo de busca do algoritmo *branch-and-bound*.

Quando há problemas que envolvem um número muito elevado de combinações, há uma demanda maior de tempo computacional. Problemas de origem não linear e que contenham variáveis de decisão inteiras podem exigir o uso de técnicas de heurísticas para agilizar o processamento (DONG et al., 2015).

Os métodos heurísticos surgiram, para fornecer soluções aceitáveis e próximas da solução ótima, dentro de um período de tempo menor, quando comparado aos métodos exatos (BORGES; EID; BERGSENG, 2014).

2.7 Pragas e doenças florestais

A implantação de monocultivos em grandes escalas tem provocado vários problemas no que se refere às pragas e doenças resistentes e especializadas nas plantas cultivadas (BRECHELT, 2004). Aliada a essa situação, há movimentação de materiais genéticos, pessoas e produtos contribuindo com a disseminação de pragas e doenças, limitando cada vez mais o sucesso dos plantios florestais (ALFENAS, 2013).

É notório que os plantios clonais proporcionam diversos benefícios, dentre eles, o aumento da produção florestal. Contudo, seu uso em grande escala vem trazendo como ponto negativo a maior vulnerabilidade à proliferação de pragas e doenças. Na eucaliptocultura, por exemplo, as doenças bióticas,

geralmente, são causadas por fungos e bactérias fitopatogênicas. A interação planta hospedeira, patógeno e ambiente ditam a incidência e severidade do ataque. Já as doenças abióticas ocorrem, em função das condições adversas do meio, como a falta ou excesso de água no solo, variação brusca da amplitude de temperatura, granizo, raio, mato, competição, toxicidade por pesticida e excessos ou escassez de nutrientes (ALFENAS et al., 2014). Segundo o mesmo autor, o efetivo controle de doenças requer a adoção de medidas que visem à redução do inóculo inicial, por meio da prevenção do patógeno ou erradicação de suas fontes. Somados a essa medida, a resistência genética e controle químico, também, são alternativas para a redução da taxa de progresso de doenças.

No âmbito das pragas florestais, em geral, os danos mais recorrentes, nos plantios brasileiros, estão atribuídos às formigas cortadeiras e cupins (BOARETTO; FORTI, 1997; COIMBRA, 2003; KRÜGER et al., 2010; LOECK; GRÜTZMACHER), ferrugem (SILVA et al., 2013) e (LANA et al., 2012), lagartas (ZANUNCIO et al., 1993), besouro amarelo (MAFIA; MENDES, 2014), percevejo bronzeado (SAAVEDRA; WITHERS; HOLWELL, 2015), vespa da galha (PEREIRA et al., 2014) e psilídeos (BURCKHAR; QUEIROZ, 2012; CAMARGO et al., 2014). O combate de cada praga é realizado, de forma específica, contudo, o principal objetivo do manejo é a restrição de suas populações, em níveis não prejudiciais ao povoamento, proporcionando o equilíbrio entre o setor econômico e ambiental.

Nesse sentido, nota-se que a alternância clonal dos plantios se apresenta como uma alternativa preventiva para a redução da proliferação dos ataques por pragas e doenças florestais. A distância entre talhões de mesmo clone, por exemplo, dificulta a extensão de um ataque. Assim, a adoção dessa prática proporcionará melhores retornos econômicos. Portanto, neste caso, o planejamento florestal deve ser tratado com espacialização, pois cada unidade de

manejo será trabalhada de forma diferenciada, sendo a restrição clonal introduzida no modelo matemático para permitir essa ação.

Muito se tem discutido sobre o planejamento espacial das florestas, contudo, em nível clonal, não são encontrados trabalhos na literatura. Os estudos espaciais mais recorrentes abordam as questões de preservação de habitats selvagens ou o realce da beleza cênica. Assim, restrições de adjacências, normalmente, são impostas com o intuito de restringir a colheita (corte raso) de talhões vizinhos dentro de um período de tempo. Na Noruega, as restrições de adjacências foram adotadas como parte do planejamento florestal (Lei nº 35 de 5 de Junho de 2009), impondo normas espaciais e temporais detalhadas sobre as práticas de colheita (BORGES; EID; BERGSENG, 2014).

Murray et al. (2000) afirmam que os pesquisadores são desafiados a desenvolver restrições de colheita de adjacência para entender uma variedade ambiental e necessidades ecológicas. Neste estudo, a necessidade ecológica e econômica visa à redução da proliferação de pragas e doenças nos plantios florestais.

Bettinger e Sessions (2003) pontuam que as maiores deficiências e desvantagens do planejamento florestal espacial se dão pela falta de pessoas capacitadas, tecnologias (grandes quantidades de memória e rápido processamento computacional), banco de dados e análises de riscos. Essa afirmação condiz com a realidade do estudo em questão, uma vez que, ainda, mostra-se incipiente. Nesse sentido, temas voltados à adjacência clonal merecem ser alvo de mais estudos, buscando a constatação da viabilidade ecológica e econômica de sua aplicação.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Ficou evidente que o Brasil possui uma posição privilegiada no cenário siderúrgico mundial. O setor siderúrgico tem passado por dificuldades, nos últimos anos, causadas por fatores internos e externos, que devem persistir ao longo dos próximos anos.

Houve um grande avanço quanto à legislação, no que diz respeito à proteção dos maciços florestais do desmatamento pelas indústrias de carvão vegetal. No entanto, há muito que ser feito, para melhorar a eficiência das florestas, nativas ou plantadas, bem como a sua proteção. O aumento do consumo de carvão vegetal, proveniente de florestas plantadas, é reflexo das pressões nacionais e internacionais para a produção de energias mais sustentáveis.

Como há o aumento da procura por energias mais limpas originárias de florestas plantadas e não de matas nativas, faz-se necessária a existência de novos plantios de florestas. Vale salientar que haverá necessidade do incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento de novas tecnologias, para contribuir para aumento do consumo de carvão vegetal, proveniente de florestas plantadas. Os plantios devem ser mais produtivos sendo necessário, também, desenvolver mecanismos de plantios e colheitas mais eficientes econômica e ecologicamente.

Fica clara a importância da sustentabilidade, para o mercado de carvão vegetal e, conseqüentemente, do mercado siderúrgico. A melhor produtividade das florestas, aliada a um bom planejamento florestal, são peças-chaves, para reduzir o custo de produção de carvão e ferro - gusa, além de diminuir a eliminação de gases causadores do efeito estufa e reduzir o consumo de madeira proveniente de florestas nativas.

Diante do exposto, pode-se concluir que a soma de um bom planejamento florestal, com novas alternativas que valorizem a ecologia e a matriz paisagística, como o uso da pesquisa operacional com as restrições espaciais, resultaram em uniões positivas de grande valor, para o

desenvolvimento sustentável, no âmbito ecológico e econômico, do setor florestal brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ALFENAS, A. C. et al. Principais doenças bióticas e abióticas. In: ALFENAS, A. C. et al. (Ed.). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa: SIF, 2014. p. 227-240.
- ALFENAS, A. C. História, evolução e o futuro da patologia florestal no Brasil. In: NÚCLEO DE ESTUDOS EM FITOPATOLOGIA. **Patologia florestal: desafios e perspectivas**. São Carlos: Suprema, 2013. p. 35-73.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF: 2013 ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013. 142 p.
- ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Números do setor**. Belo Horizonte: MAS, 2009. Disponível em: <<http://www.silvimirinas.com.br>>. Acesso em: 27 dez. 2014.
- BACHMATIUK, J.; GARCIA-GONZALO, J.; BORGES, J. G. Analysis of the performance of different implementations of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling. *Silva Fennica, Helsinki*, v. 49, n. 4, p. 01-18, 2015.
- BANCO ITAÚ. **Macro setorial**. São Paulo: Itaú, 2015a. 8 p. Disponível em: <https://www.itaubank.com.br/_arquivosstaticos/itaubank/contents/common/docs/201501_MACRO_SETORIAL-SIDERURGIA_.pdf>. Acesso em: 24 out. 2015.
- BANCO ITAÚ. **Macro setorial: siderurgia: cenário ainda desafiador em 2013 e em 2014**. São Paulo: Itaú, 2014. Disponível em: <https://www.itaubank.com.br/_arquivosstaticos/itaubank/contents/common/docs/21308_MACRO_Setorial_Siderurgia.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2014.
- BANCO ITAÚ. **Macro Setorial: siderurgia: desafios contínuos**. São Paulo: Itaú, 2015b.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: a review. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 188, n. 2/4, p. 145-173, Nov. 2005.
- BATEMAN, T. S.; SNELL, S. A. **Administração management: construindo vantagem competitiva**. São Paulo: Atlas, 1998. 539 p.
- BETTINGER, P.; SESSIONS, J. Spatial forest planning: to adopt, or not to adopt? **Journal of Forestry**, Washington, v. 101, n. 2, p. 24-29, Mar. 2003.

BOARETTO, M. A. C.; FORTI, L. C. Perspectivas no controle de formigas cortadeiras. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 31-46, maio 1997.

BORGES, J. G.; HOGANSON, H. M.; ROSE, D. W. Combining a decomposition strategy with dynamic programming to solve spatially constrained forest management scheduling problems. **Forest Science**, Bethesda, v. 45, n. 2, p. 201-212, Apr. 1999.

BORGES, P.; EID, T.; BERGSENG, E. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 233, n. 3, p. 700-710, Mar. 2014.

BOSTON, K.; BETTINGER, P. Development of spatially feasible forest plans: a comparison of two modelling approaches. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 35, n. 4, p. 425-435, 2001.

BRECHELT, A. **Manejo ecológico de pragas e doenças**. Santiago de Chile: RAP, 2004. 33 p.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 185-193, jan./abr. 2007.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. New York: Academic Press, 2003. 439 p.

BUONGIORNO, J.; GILLES, J. K. Forest management and economics. **Biometrical Journal**, Berlin, v. 31, n. 7, p. 840, 1989.

BURCKHARDT, D.; QUEIROZ, D. L. Checklist and comments on the jumping plant-lice (Hemiptera: Psylloidea) from Brazil. **Zootaxa**, Basel, v. 3571, p. 26-48, 2012.

CAMARGO, J. M. M. et al. Resistência de clones de Eucalyptus ao psilídeo-de-concha. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 77, p. 91-97, jan./mar. 2014.

CARO, F. et al. Evaluating the economic cost of environmental measures in plantation harvesting through the use of mathematical models. **Production and Operations Management**, Baltimore, v. 12, n. 3, p. 290-306, Sept. 2009.

CASTRO, R. R. **Regulação de florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

CEA, C.; JOFRÉ, A. Linking strategic and tactical forestry planning decisions. **Annals of Operations Research**, Amsterdam, v. 95, n. 1, p. 131-158, Jan. 2000.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Siderurgia no Brasil 2010-2025: subsídios para tomada de decisão**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. 112 p. (Documentos Técnicos, 9).

CHURCH, R. L.; MURRAY, T. M.; BARBER, K. H. Forest planning at the tactical level. **Annals of Operations Research**, Amsterdam, v. 95, n. 16, p. 3-18, 2000.

COVINGTON, W. W. et al. TEAMS: a decision support system for multi resource management. **Journal of Forestry**, Washington, v. 86, n. 8, p. 25-33, Aug. 1988.

DAVIS, L. S. et al. (Ed.). **Forest management**. New York: McGraw Hill, 2000. 790 p.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987. 790 p.

D’VILA FILHO, B. M. **Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa, cenário em 2020**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2014. 63 p.

DONG, L. et al. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: A case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 356, p. 124-135, Nov. 2015.

DYKSTRA, D. P. et al. **Mathematical programming for natural resource management**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984. 311 p.

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. 608-621, July 2002.

FALCÃO, A. O.; BORGES, J. G. Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal em problemas de grande dimensão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 94-102, jun. 2003.

FURTADO, E. L.; SANTOS, C. A. G.; MASSON, M. V. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre a ferrugem do eucalipto no Estado de São Paulo. In: GHINI, R.; HAMADA, E. **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 273-286.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 2009. 256 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

GUSTAFSSON, K. et al. **Logistical determinants in timber harvesting schedule-accounting for geographical aspects in medium term forest planning**. Helsinki: IUFRO, 2000.

HARWOOD, C. New introductions: doing it right. In: WALKER, J. (Ed.). **Developing a eucalypt resource: learning from Australia and elsewhere** Wood Technology Research Centre. Christchurch: University of Canterbury, 2011. p. 125–136.

HILLER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Campus, 1998. 805 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2015: ano base 2014**. Brasília: IBÁ, 2015. 80 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatística preliminar**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>>. Acesso em: 24 out. 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2013**. Rio de Janeiro: IABR, 2013. 49 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2014**. Rio de Janeiro: IABR, 2014. 49 p.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. Consumo de carvão vegetal de origem nativa cai 61% em Minas. **Portal MeioAmbiente.mg**, São Paulo, abr. 2012. Disponível em: <<http://www.ief.mg.gov.br/noticias/1/1354-consumo-de-carvao-vegetal-de-origem-nativa-cai-61-em-minas>>. Acesso em: 27 dez. 2014.

JAMNICK, M. S.; WALTERS, K. R. Spatial and temporal allocation of stratum based harvest schedules. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, n. 3, p. 402-413, 1993.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives- discussion and synthesis. **Forest Science**, Bethesda, v. 18, n. 1, p. 01-31, Mar. 1977.

JUNGHANS, D. T. **Quantificação da severidade, herança da resistência e identificação de marcadores RAPD ligados à resistência à ferrugem (*Puccinia psidii*) em *Eucalyptus grandis***. 2000. 53 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

KRÜGER, L. R. et al. Influência do cultivo de Eucalyptus sobre a comunidade de formigas cortadeiras nas regiões sul e campanha do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 16, n. 1/4, p. 51-55, 2010.

LANA, V. M. et al. Survival and dispersal of *Puccinia psidii* spores in eucalypt wood products. **Australasian Plant Pathology**, Austrália, v. 41, n. 3, p. 229-238, May 2012.

LEUSCHNER, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley & Sons, 1984. 298 p.

LEUSCHNER, W. **Forest regulation, harvest scheduling, and planning techniques**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 281 p.

LOECK, A. E.; GRÜTZMACHER, D. D.; COIMBRA, S. M. Ocorrência de formigas cortadeiras do gênero *Acromyrmex* nas principais regiões agropecuárias do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 9, n. 2, p. 129-133, abr./jun. 2003.

LOTFI, S. V. **A siderurgia brasileira a carvão vegetal: um estudo de arranjos verticais**. 2010. 141 p. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MAFIA, R. G.; MENDES, J. E. P. Surtos e danos causados pelos besouros esfolhadores *Costalimaita ferruginea* (Fabricius, 1801) e *Costalimaita lurida* (Lefèvre, 1891)(Coleoptera: Chrysomelidae) em plantios de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 829-836, 2014.

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, July 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, 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.

MEILBY, H.; STRANGE, N.; THORSEN, B. J. optimal spatial harvest planning under risk of windthrow. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 149, n. 1, p. 15-31, July 2001.

MURRAY, A. T.; CHURCH, R. L. Applying simulated annealing to location-planning models. **Journal of Heuristics**, Boston, v. 2, n. 1, p. 31-53, June 1996.

MURRAY, A. T. et al. Spatial modeling in forest management and natural resource planning. **Forest Science**, Bethesda, v. 46, n. 2, p. 153-156, 2000.

NELSON, J., BRODIE, J. D.; SESSIONS, J. Integrating short term, area based logging plans with long term harvest schedules. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, p. 101-122, 1991.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, out./dez. 2011.

PEREIRA, J. M. et al. Registro de *Leptocybe* invasora no estado de Goiás. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 10, p. 1721-1724, out. 2014.

RAAD, T. J.; MELO, V. F. **Avaliação sócio ambiental dos obstáculos econômicos, técnicos e regulatórios para atingimento da meta de redução e emissões na siderurgia brasileira**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2014. 19 p.

REIS, A. et al. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 497-505, out./dez. 2012.

RICHARDS, E. W.; GUNN, E. A model and tabu search method to optimize stand harvest and road construction schedules. **Forest Science**, Bethesda, v. 46, n. 2, p. 188-203, May 2000.

RODRIGUES, F. L. et al. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 769-778, set./out. 2006.

RÖNNQVIST, M. et al. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, Amsterdam, v. 232, n. 1, p. 11-40, Sept. 2015.

SAAVEDRA, M. C.; WITHERS, T. M.; HOLWELL, G. I. Susceptibility of four Eucalyptus host species for the development of *Thaumastocoris peregrinus* Carpintero and Dellapé (Hemiptera: Thaumastocoridae). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 336, p. 210-216, Jan. 2015.

SCHERER, W. G. S. **Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa, cenário em 2020 – ênfase:** uso da energia gerada na combustão dos gases da carbonização. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2014. 33 p.

SILVA, G. F. et al. Problemas com o uso de programação linear com posterior arredondamento da solução ótima, em regulação florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 677-688, set./out. 2003.

SILVA JUNIOR, A. G. **Sistemas de suporte à decisão integrado a sistemas especialistas:** uma aplicação para gerenciamento de fazendas produtoras de leite. 1993. 94 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

SILVA, M. L. da et al. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p.1073-1079, nov./dez. 2007.

SILVA, P. H. M. et al. Selecting for rust (*Puccinia psidii*) resistance in *Eucalyptus grandis* in São Paulo State, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 303, p. 91-97, Sept. 2013.

SILVA, R. T. **Planeamento florestal, modelos de programação inteira multiobjectivo e aplicações**. 2004. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1091-1099, nov./dez. 2010.

TEIXEIRA, A. F. **Aplicação de algoritmos evolucionários na solução de problemas de planejamento florestal multiobjetivo**. 2002. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de Eucalyptus. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, set./out. 2009.

TRUGILHO, P. F. et al. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

VAN DEUSEN, P. C. Multiple solution harvest scheduling. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 33, n. 3, p. 207-216, 1999.

VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A.C. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. **BNDS Setorial**, Rio de Janeiro, n. 30, p. 237-297, 2011.

ZANUNCIO, J. C. et al. **Hemípteros predadores de lagartas desfolhadoras de eucalipto**: manual de pragas em floresta: biologia, ecologia e controle (1). Viçosa: IPEF, 1993. 140 p.

SEGUNDA PARTE

**ARTIGO 1 - ESPACIALIZAÇÃO SILVICULTURAL ÓTIMA DE
CLONES DE EUCALIPTO E SEUS EFEITOS ECONÔMICOS NO
PLANEJAMENTO FLORESTAL**

**Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003), conforme
exigido pela UFLA para artigos ainda não submetidos a periódicos.**

Tayrine Vieira Martins¹

Lucas Rezende Gomide²

Antônio Carlos Ferraz Filho²

Pedro Resende Silva³

¹ (Engenheira Florestal, Mestranda em Engenharia Florestal, UFLA)

² (Engenheiro Florestal, Doutor em Engenharia Florestal, Professor – UFLA)

³ (Engenheiro Florestal, Mestre em Engenharia Florestal- UFLA)

RESUMO

Atualmente um novo conceito de planejamento florestal vem se popularizando, o planejamento florestal espacial. Nele a unidade de manejo ou talhão passa a ser visto de maneira mais abrangente com análise para seu tamanho, forma e distribuição em relação aos demais. Para este problema, foram elaborados modelos de Programação Linear Inteira (PLI), com uso de restrições do planejamento tradicional, restrições espaciais do tipo URM (*Unit Restriction Model*) colheita e restrição de adjacência clonal, nova aplicação de URM. Objetivou-se, com este trabalho, criar um modelo de minimização de custo utilizando restrição de adjacência clonal. A intenção desta restrição é reduzir o tamanho de áreas homogêneas, em florestas de eucalipto e, desta forma, diminuir a proliferação de pragas e doenças além de contribuir para a tomada de decisão do gestor florestal. O processamento dos dados foi realizado, nos princípios da PLI e gerou 12 cenários que diferenciaram entre si pela natureza das restrições, espacial e não espacial, bem como restrições volumétricas e limite de área a ser reformada. O volume médio colhido nos cenários sem restrição espacial foi 0,64% maior em relação àqueles com restrições espaciais. A adição de restrição espacial reduziu o valor da função objetivo. Nos cenários, em que houve restrição de área mínima de reforma, houve diferenças significativas nos custos. Para os cenários com 50, 40 e 30% de área de reforma, houve um aumento de 15, 11 e 8% no custo final, respectivamente. Os mapas gerados evidenciam, na matriz paisagística, a eficiência da aplicação das restrições espaciais. A aplicação da restrição de adjacência clonal mostrou-se melhor que a URM colheita e seu custo ficou próximo do planejamento tradicional, apenas 0,14% superior, comprovando a viabilidade de sua aplicação no contexto de medida preventiva de proliferação de pragas e doenças, despontando como uma ferramenta potencial, para redução de custos com manejo de pragas.

Palavras-chave: Planejamento espacial. URM. Adjacência. Pragas florestais.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento florestal abrange três características que, em conjunto, tornam o seu exercício um grande desafio para o gestor florestal. Primeiro, pela existência de múltiplos objetivos que, em alguns momentos, podem ser conflitantes. Segundo, o planejamento florestal trabalha com períodos longos de tempo, a fim de refletir a natureza dos problemas florestais. E, por fim, o planejamento florestal é complexo em razão do elevado volume de informações requisitadas. Estas dificuldades surgem da existência de interação de muitos processos diferentes, grandes áreas e dados inconsistentes. Geralmente há um alto grau de incerteza quando se prevê o resultado de diferentes variáveis econômicas e ecológicas. Assim, para facilitar o planejamento florestal, o qual, normalmente, é dividido em uma estrutura hierárquica, formam-se os níveis estratégicos, táticos e operacionais (DAVIS et al., 2000).

Por um longo tempo e, em muitos países ao redor do mundo, o planejamento florestal preocupava-se apenas com aspectos econômicos e de produção. Hoje, há uma maior consciência da importância do padrão paisagístico sobre as funções ecológicas das florestas. Estas preocupações exigem novos desenvolvimentos de modelos, no planejamento florestal, sendo necessário o envolvimento de informações espaciais (DONG et al., 2015).

A diferença entre o planejamento florestal espacial e o tradicional é o fato de como analisar o talhão dentro da floresta. No planejamento tradicional, o talhão é apenas uma unidade de produção, desconectada dos demais talhões, já, no planejamento espacial, passa-se a observar o tamanho, a forma e a distribuição do talhão no interior da floresta. Basken e Keles (2005) asseveram que, para este último caso, são formuladas restrições espaciais, sendo as mais conhecidas, restrição de adjacência do tipo URM (*unit restriction model*) e do tipo ARM (*area restriction model*). A abordagem URM não permite a colheita de talhões vizinhos em um mesmo horizonte de planejamento (HP). Esta

restrição é de fácil aplicação e, por esse motivo, é mais difundida entre os planejadores florestais. É considerada muito rígida, uma vez que não considera a área dos talhões envolvidos para o corte. A restrição do tipo ARM permite o corte de talhões adjacentes desde que a área a ser colhida não ultrapasse o limite máximo de área permitido. Do ponto de vista do cálculo, a restrição ARM é de difícil formulação, em razão da complexidade de se relacionar os talhões de forma contínua (BACHMATIUK; GARCIA-GONZALO; BORGES, 2015). Para o presente trabalho, aquela que melhor se adequa ao problema é a do tipo URM, por este motivo ela foi utilizada.

Borges et al. (2014) defendem que o uso de restrição de adjacência tornou-se uma parte importante, nas práticas florestais, em todo o mundo. Diversos trabalhos têm sido realizados com uso de restrições de adjacência, em diferentes contextos, na silvicultura (BASKENT; KELES, 2005; BORGES; BERGSENG; EID, 2014a; DONG et al., 2015; SHAN et al., 2009), manutenção de corredores ecológicos (FISCHER; CHURCH, 2003; HEINONEN et al., 2007), controle de área mínima e máxima (HEINONEN; PUKKALA, 2004; MARTINS et al., 2014; MCDILL; REBAIN; BRAZE, 2002; OHMAN; LAMAS, 2003), desenvolvimento e manutenção de habitat (PUKKALA et al., 2012; TÓTH et al., 2008), diminuição da fragmentação florestal (BORGES; HOGANSON; 2000; OHMAN; LAMAS, 2005), *green up* (BOSTON; BETTINGER, 1999; BOSTON; BETTINGER, 2006; BRUMELLE et al., 1998; STRIMBU; INNES; STRIMBU, 2010; ZHU; BEETINGER, 2008), dentre outros. No Brasil, trabalhos envolvendo planejamento espacial, também, vêm sendo realizados podendo citar, Alonso (2003), Binotti et al. (2014), Castro, (2007), Gomide, Arce e Silva (2010) e Gomide, Arce e Silva (2013). Até o presente momento, não foram encontrados trabalhos, envolvendo o uso de restrições espaciais, no contexto de proteção e segurança de florestas plantadas contra pragas e doenças.

Considera-se que a cultura do eucalipto é uma das mais importantes do Brasil. No entanto, sofre com ataques de pragas e doenças, desde a sua fase de viveiro até plantios adultos (TUMURA; DE PIERI; FURTADO, 2012). A busca por plantas resistentes ou tolerantes ao ataque de insetos tem sido uma alternativa economicamente viável para conter as populações das pragas em níveis inferiores ao de dano econômico (QUEIROZ et al., 2013). Alguns desses danos são mais recorrentes e atribuídos à ferrugem (SILVA et al., 2013) e (LANA et al., 2012), lagartas (ZANUNCIO et al., 1993), besouro amarelo (MAFIA; MENDES, 2014), percevejo bronzeado (SAAVEDRA; WITHERS; HOLWELL, 2015), vespa da galha (PEREIRA et al., 2014) e psilídeos (BURCKHARD; QUEIROZ, 2012; CAMARGO et al., 2014). O problema relacionado a pragas tem se agravado em decorrência do aumento de áreas plantadas de eucalipto, principalmente, para a produção de celulose e energia (CAMARGO et al., 2014). Desta forma, faz-se necessária a criação de novas alternativas, para controle e prevenção de pragas e doenças, no setor da eucaliptocultura, ou disposição espacial dos plantios, para garantir uma maior resistência à proliferação de patógenos.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo apresentar uma nova aplicação da restrição URM, em modelos de minimização de custos de produção. A proposta foi usar uma nova abordagem da URM, na silvicultura, considerando a adjacência clonal uma alternativa de medida preventiva de proliferação de pragas e doenças em plantios de eucalipto. Além disso, gerar diferentes cenários e avaliar os resultados obtidos, com base nos padrões de dispersão dos talhões e sobre a produção física e econômica proveniente da floresta, também, será realizado.

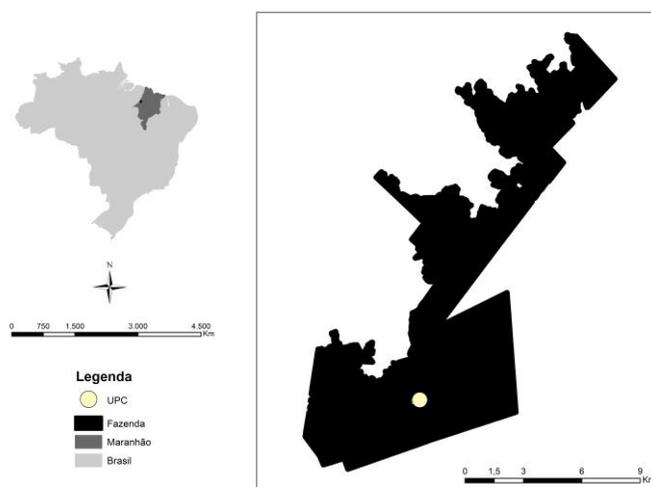
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 O problema florestal e área de estudo

O trabalho abordou o problema de planejamento florestal tendo como foco a segurança florestal, no que diz respeito à proliferação de pragas e doenças em plantios de eucalipto. Buscou-se a redução de custos de produção, juntamente com o uso da espacialização ótima de clones, com base na aplicação restrição de adjacência clonal.

O estudo foi desenvolvido em uma fazenda pertencente a uma empresa do setor siderúrgico, localizada no município de Açailândia, no estado do Maranhão, na região nordeste do Brasil (Figura 1). A fazenda é formada por 282 talhões, totalizando uma área de 10.051,45 hectares. A empresa possui 35 tipos de materiais genéticos de eucalipto e uma unidade de produção de carvão (UPC). Esta, por sua vez, é composta por 576 fornos circulares e 54 fornos retangulares.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte Adaptado da Empresa Florestal (2015)

2.2 Análise econômica e condução florestal

O regime de manejo adotado pela empresa é o *Energy Wood*, isto é, utiliza a madeira para produção de carvão vegetal que abastece a indústria siderúrgica. Esse regime de manejo tem como característica menor ciclo de corte e a madeira produzida deve apresentar elevados valores de densidade básica (FREDERICO, 2009; NEVES et al., 2011; REIS, 2012; TRUGILHO et al., 1997; TRUGILHO et al., 2001; TRUGILHO et al., 2009).

No sentido de resolução do problema, previamente, é necessário gerar as alternativas de manejo (AM). Para este problema, as AM são compostas por todas as combinações possíveis entre talhões, momento de corte (relacionado à idade atual do talhão), silvicultura (reforma ou brotação), material genético (clone) e UPC de destino. Quando há a opção de reforma, existe a alternativa de troca de clone (clone 4, clone 5 ou clone 11). Para a troca de clone, consideraram-se os clones mais utilizados pela empresa.

O horizonte de planejamento adotado foi de cinco anos, pois se trata de florestas de curto ciclo de rotação e destinadas para a produção de carvão. Adotou-se idade mínima de corte cinco anos e máxima de nove anos.

Cada AM possui um custo final de produção. Este valor final é calculado pelo somatório dos custos descapitalizados de implantação e manutenção da reforma ou custo de implantação e manutenção da brotação, custo da terra, custo de colheita e de transporte da madeira do talhão até a UPC. Neste último caso, o custo de transporte foi adquirido pelo valor do menor custo de deslocamento do talhão para a UPC. O roteamento e o custo de deslocamento do talhão a UPC foram disponibilizados pela empresa.

Os custos obtidos foram descapitalizados, para o ano zero, sendo, então, calculado o VPC (Valor Presente dos Custos) (1). Em que: VCP é o valor dos custos descapitalizados para o ano zero; CT custo total no ano t e y é a taxa de juros anual aplicada, considerada de 8% a.a.

$$VPC = \sum_{t=0}^{HP} \frac{CT_t}{(1+y)^t} \quad (1)$$

As projeções de crescimento volumétrico da floresta foram geradas com base no modelo (2), em que Id é a idade em anos e β_0 e β_1 são os parâmetros da equação e V o volume. Este mesmo modelo foi ajustado por clones e, também, como um modelo genérico para produção geral da fazenda. Os modelos foram gerados com base nos dados de inventário da empresa. Quando não havia correspondência de clone, foi usado o modelo genérico da fazenda.

$$V = e^{((\beta_0 + \beta_1) + (1/Id))} \quad (2)$$

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12

2.3 Programação matemática e análise comparativa dos cenários

O problema abordado, envolvendo o agendamento da colheita, teve como base o modelo proposto por Johnson e Scheuman (1977). Neste caso, em razão ds características de manejo florestal, aliado à colheita, empregou-se o uso de variáveis binárias $\{0, 1\}$ para as variáveis decisórias. Considerando essa premissa, a função objetivo (3) foi desenvolvida, para minimizar o custo total de produção de madeira (R\$), envolvendo todas as atividades florestais do empreendimento. Não foi computada a venda da madeira (receita), pois a empresa consome toda a madeira gerada para a produção de carvão vegetal. Em

que: C_{ij} representa o custo de produção total de cada talhão i seguindo a alternativa de manejo j , ao longo do horizonte de planejamento. X_{ij} é a variável de decisão (binária) relacionada ao talhão i , assinalada a alternativa de manejo j ; M é o número total de unidades de talhões i ; N é o número total de alternativas de manejo j aplicada a cada talhão i .

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C_{ij} \cdot X_{ij} \quad (3)$$

Por causa da necessidade de produção constante e baixa variação nos estoques produtivos, as restrições volumétricas (4) e (5) foram desenvolvidas, em que: v_{ij} volume produzido no talhão i em prescrição da alternativa de manejo j , V_T é uma variável de decisão constante a ser definida pelo modelo, sendo relacionada ao volume, em m^3 a ser colhido ao longo de cada ano T do horizonte de planejamento.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ij} \cdot X_{ij} \geq 1,1 \cdot V_T; \forall T = 1, 2, 3 \dots 5 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ij} \cdot X_{ij} \leq 1,5 \cdot V_T; \forall T = 1, 2, 3 \dots 5 \quad (5)$$

Em virtude do ciclo curto de rotação, características do manejo florestal para a espécie, a restrição (6) foi desenvolvida para se adotar apenas uma única alternativa de manejo por talhão, evitando seu abandono.

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1; \forall i \quad (6)$$

Foram utilizadas restrições de área mínima a ser reformada (7). Em que: a_i é a área do talhão i , A é a área total da fazenda em hectares e R é a taxa de reforma.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_i \cdot X_{ij} \geq R \cdot A; \forall R = 0,3; 0,4; 0,5 \quad (7)$$

Restrições de não negatividade e binárias, também, foram incluídas para que as características do problema formulado fossem atendidas.

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad (8)$$

O conjunto de equações citadas compõe a estrutura do modelo base testado, sem a inclusão de aspectos espaciais, que se pretende avaliar. Logo, para ser ter um melhor entendimento de seus efeitos econômicos, foram definidos três grupos de modelos, contendo um conjunto de cenários econômicos e produtivos. No grupo 1 (planejamento tradicional), não foram testadas restrições espaciais, sendo o modelo composto pelas restrições (4), (5), (6), (7) e (8).

O grupo 2 (planejamento espacial) contemplou, ainda, a restrição de adjacência URM (*unit restriction model*) de colheita, conforme proposto por Mcdill, Rebain e Braze (2002a), sendo a restrição (9) aplicada para impedir o corte de talhões adjacentes, em que: m_{ik} coeficientes da matriz binária $\{0,1\}$ de adjacência entre talhões, em que $i=k$, k é o número do talhão.

$$\sum_{i=1}^M m_{ik} \cdot X_{ijT} + \left[\sum_{j=1}^M m_{ik} \right] \cdot X_{ijT} \leq \sum_{i=1}^M m_{ik}; \forall k, \forall j, \forall T = 1, 2, 3, \dots, 5 \quad (9)$$

Em razão da rigidez causada por este tipo de restrição (GOMIDE; ARCE; SILVA, 2013), a equação (6) foi sendo flexibilizada, permitindo o abandono de talhões com uso da seguinte restrição.

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} \leq 1; \forall i \quad (10)$$

De acordo com Tóth et al. (2012), um problema envolvendo restrições do tipo URM é muito mais fácil de formular e, geralmente, resolver do que ARM. No entanto, os valores resultantes são, geralmente, mais baixos do que problemas semelhantes que usam restrições ARM, por sua maior flexibilidade. Gomide, Arce e Silva (2013) afirmam que a restrição do tipo URM é mais rígida, por não contemplar a área dos talhões envolvidos para o corte.

O terceiro e último grupo considera o uso de restrições de adjacência clonal e as equações bases de restrições do modelo (4), (5), (6), (7) e (8). Contudo, quando houver a opção de reforma, ou seja, novos plantios na área, há uma preocupação com a troca de material genético (clones 4, 5 ou 11), que não poderão formar blocos de talhões homogêneos e vizinhos de um mesmo material genético. A restrição de adjacência clonal é apresentada em (11). Em que c = marcador que indica clone.

$$\sum_{i=1}^M m_{ik} \cdot X_{ijT}^c + \left[\sum_{j=1}^M m_{ik} \right] \cdot X_{ijT}^c \leq \sum_{i=1}^M m_{ik}; \forall k, \forall j, \forall T = 1, 2, 3, \dots, 5; \forall c = (4, 5, 11) \quad (11)$$

A construção de cenários fez-se necessária, uma vez que amplia a possibilidade de discussão, auxiliando na tomada de decisão e avaliação de seus impactos econômicos e produtivos. Ao todo foram gerados 12 cenários, variando as taxas de reforma (plantio) e a combinação de restrições para a sua formação

(Tabela 1). A formulação dos problemas de programação linear inteira foi realizada no software LINGO® (LINDO SystemsInc), versão 15.0 de licença acadêmica, empregando o algoritmo *branch and bound*.

Tabela 1 - Combinação de cenários por grupo considerando restrições volumétricas, binária, abandono e não abandono, área mínima de reforma, URM colheita e URM silvicultura.

Equações	Cenários											
	Grupo 1				Grupo 2				Grupo 3			
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x					x	x	x	x
7 (50%)		x				x				x		
7 (40%)			x				x				x	
7 (30%)				x				x				x
8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9					x	x	x	x				
10					x	x	x	x				
11									x	x	x	x

3 RESULTADOS

A combinação das possibilidades de manejo gerou um total de 3.536 variáveis de decisão. O resultado do processamento dos cenários pelo método “exato” é apresentado, de maneira sumarizada, na Tabela 2.

O tempo de processamento foi superior nos cenários que continham a restrição de adjacência, sendo os cenários do grupo 2 aqueles que mais demandaram tempo de processamento. O grupo 2 apresentou os menores custos, em virtude da não imposição do corte de todos os talhões, enquanto os grupos 1 e 3 foram bastante similares entre si. Esse efeito é mais bem observado no número reduzido de talhões não abandonados pelo modelo. Os maiores volumes colhidos foram os cenários do grupo 1, seguido pelo grupo 3 e grupo 2.

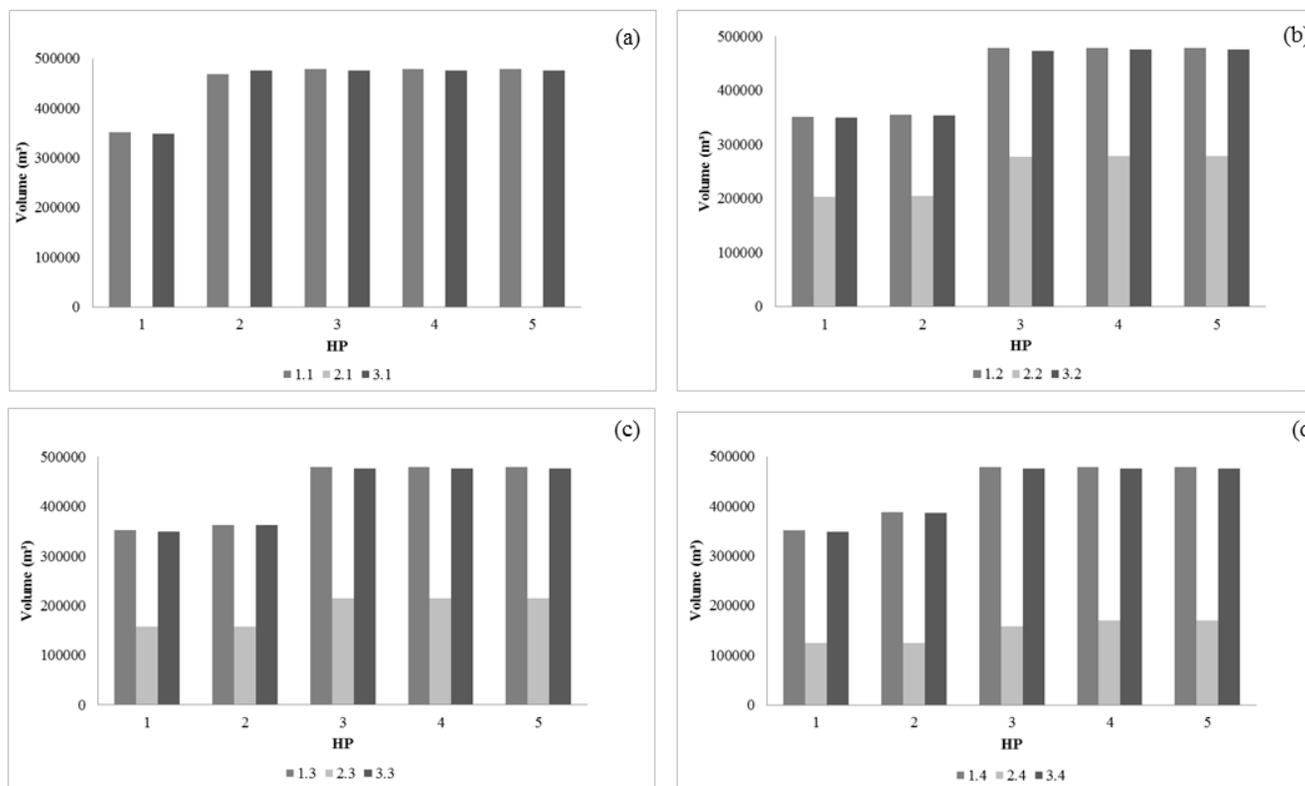
Tabela 2 - Resultado de custo, tempo de processamento, volume e número de talhões colhidos

Grupo	Cenário	Custo (R\$)	Tempo de processamento (s)	Volume total (m³)	Talhões colhidos (Nº)
1	1.1	55.523.444,59	102	319.378,90	282
	1.2	63.848.048,27	105	319.381,40	282
	1.3	61.819.070,62	106	319.381,50	282
	1.4	59.971.319,54	52	319.381,60	282
2	2.1	0	35	0	0
	2.2	36.530.633,18	19.692	185.462,60	136
	2.3	28.534.293,18	324.000	143.116,90	106
	2.4	20.669.438,06	324.000	113.175,50	81
3	3.1	55.648.790,31	16.620	317.327,90	282
	3.2	63.917.696,35	64.426	317.327,90	282
	3.3	61.895.773,40	3.455	317.327,90	282
	3.4	60.044.865,60	1.938	317.327,90	282

Na Figura 2 o comportamento do volume é apresentado ao longo do horizonte de planejamento. Podem-se comparar os cenários sem imposição de restrições de reforma de área (figura 2a) com os cenários com reforma de área mínima de 50, 40 e 30%, nas figuras 2b, 2c e 2d, respectivamente.

Na maioria dos cenários, verificou-se que o volume colhido, ao longo do HP, tornou-se constante a partir do terceiro ano, um fato importante para a indústria. Observa-se que o volume médio colhido nos cenários sem restrição espacial (Grupo 1) foi 0,64% maior.

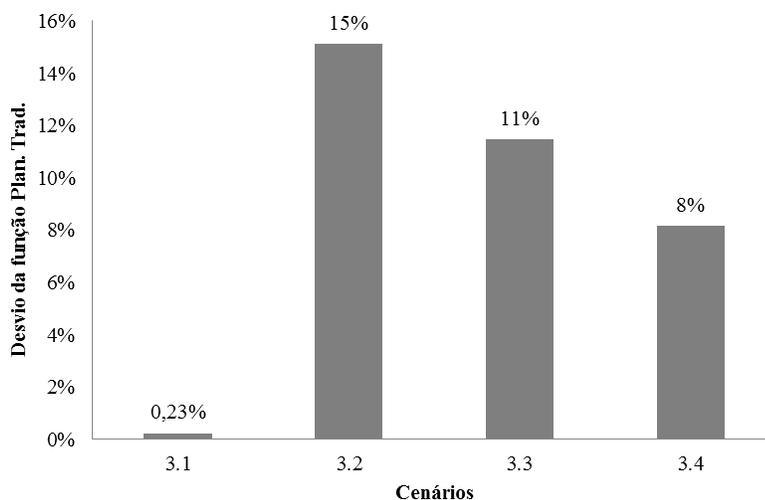
Figura 2 - Gráfico de volume para cada cenário ao longo do horizonte de planejamento. Cenário sem área de reforma (a), com 50% de área de reforma (b), com 40% de área de reforma (c) e com 30% de área de reforma (d).



A adição de restrições espaciais, grupo 3, reduziu o valor da função objetivo, aumentou o custo, exceto para os cenários grupo 2 no qual se permitiu o abandono de talhões.

O impacto maior foi entre os cenários com porcentagens de área de reforma. A Figura 3 evidencia o desvio do custo, em porcentagem, dos cenários com restrição de adjacência clonal (grupo 3) em relação ao cenário sem restrição espacial e sem área de reforma (cenário 1.1). A restrição de área mínima de reforma influenciou no custo final. O menor desvio foi para o cenário que não usa restrição de área mínima de reforma (3.1). Nos cenários, em que houve restrição de área mínima de reforma, houve diferenças nos custos. Para os cenários com 50 (3.2), 40 (3.3) e 30% (3.4) de área de reforma, houve um aumento de 15, 11 e 8% no custo final, respectivamente. Constatou-se que, ao diminuir a área mínima para reforma, o desvio, também, diminuiu. A diferença entre as médias dos custos dos cenários do grupo 1 e 3 foi de 0,14%.

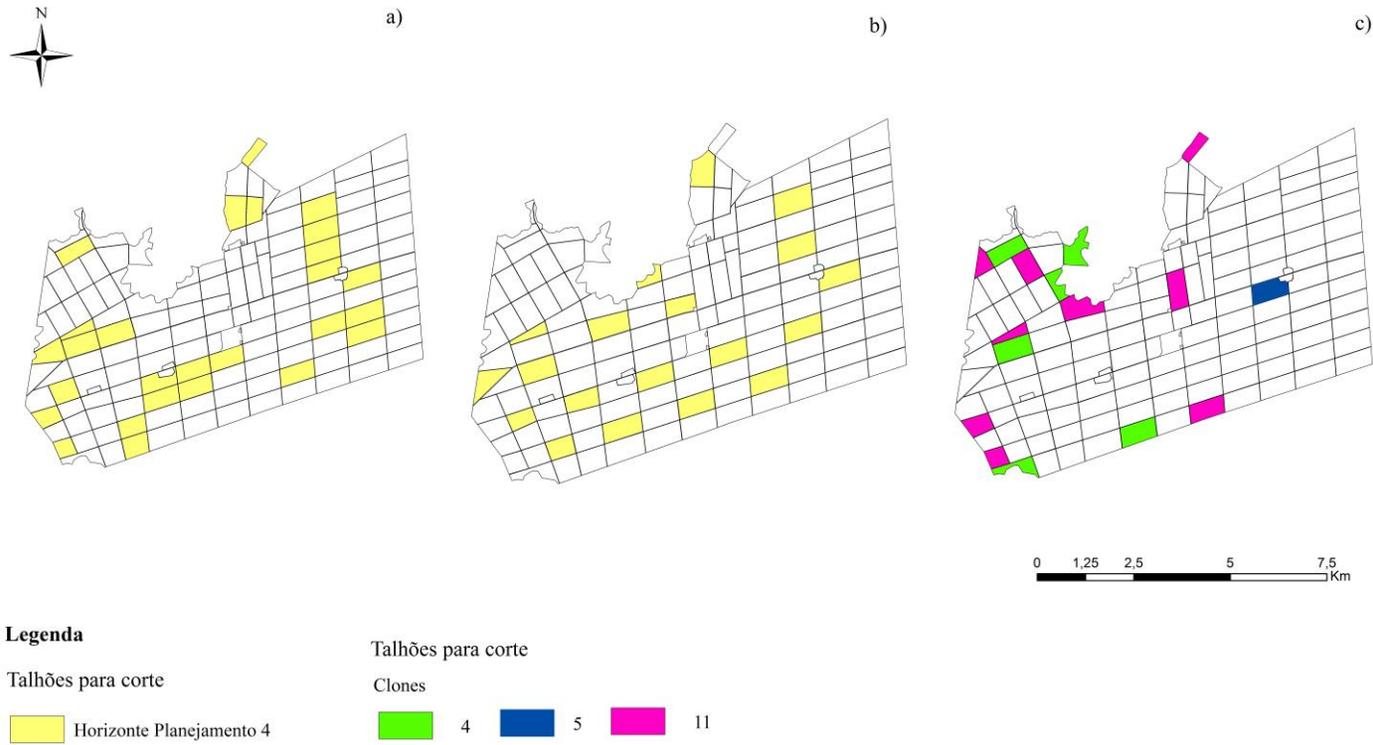
Figura 3 - Gráfico de desvio de custo total do grupo 3 em relação ao planejamento tradicional (cenário 1.1)



Foram gerados mapas de agendamento da colheita a partir do processamento dos modelos. Os mapas foram fundamentais para verificação do aspecto espacial dos cenários. Na Figura 4, observam-se os mapas de agendamento da colheita para o quarto período do HP.

Figura 4 - Mapa parcial da fazenda com ilustração do efeito espacial, no agendamento da colheita florestal, para um único ano do horizonte de planejamento, sendo: (a) cenário 1.2, (b) cenário 2.2 e (c) cenário 3.2.

28



Na Figura 4a, pode-se observar que os cenários, sem restrição espacial (planejamento tradicional), tiveram talhões adjacentes colhidos em um mesmo período do HP, o que não ocorre quando utilizadas restrições espaciais do tipo URM tradicional (Figura 4b). A inovação da restrição de adjacência clonal encontra-se na Figura 4c. Quando havia a possibilidade de se realizar a reforma do talhão, não se permitiu o plantio de materiais genéticos (clones) iguais em talhões adjacentes. Notou-se que esta estratégia foi respeitada.

4 DISCUSSÃO

Os cenários, contendo as restrições de adjacência, foram mais complexos de serem formulados, exigindo, ainda, um maior esforço computacional para a obtenção de soluções ótimas. Essa dificuldade pode ser justificada pela complexidade em identificar as relações de adjacência entre os talhões e uma combinação viável e ótima como solução, além de conter um número maior de restrições. No trabalho de Tóth et al. (2012), foi evidenciado que a estrutura espacial do problema pode exercer impacto negativo, uma vez que eleva o número de combinações, deixando a formulação mais complexa. Embora o uso das restrições espaciais aumente a complexidade do problema, Borges, Bergseng e Eid (2014a) defendem que, para ter ferramentas eficientes de planejamento, o uso de restrições espaciais é imprescindível. Em outro trabalho, Borges, Bergseng e Eid (2014b) afirmam que as restrições de adjacência, juntamente com as restrições de volume de colheita, são importantes para o manejo florestal.

No processamento dos modelos, o método exato de resolução contribuiu para um elevado tempo de processamento que variou de 35 a 324.000 segundos (Tabela 3). O mesmo comportamento foi observado nos trabalhos de Bachmatuk, Garcia-Gonzalo e Borges (2015), Bettinger et. al. (2009), Dong et al. (2015), Gomide, Arce e Silva (2010) e Tóth et al. (2012). A estratégia a ser seguida, para reduzir este tempo, pode estar associada a métodos aproximativos, como as meta-heurísticas, observados nos trabalhos de Öhman e Eriksson (2002) e Pukkala e Kurttila (2005).

Quando se analisa o número de talhões abandonados por cenário, constatou-se que, nos cenários do grupo 2, seu valor foi extremamente alto, contendo valores de 51% a 71% de talhões abandonados. Nesse grupo, foi necessário permitir o abandono de talhões no modelo, para encontrar soluções viáveis. Mesmo sendo mais flexível, o cenário 2.1 não obteve uma solução

viável, valor zero, confirmando o fato. Isso demonstra a necessidade de se avançar em métodos aproximativos, com o uso de meta-heurísticas, conforme apresentado por Ohman e Lamas (2005) e Pukkala e Heinonen (2006).

Bertomeu e Romero (2001) e Murray e Weintraub (2002) acreditam que o uso do método exato em problemas complexos e extensos pode ser pouco realista. Esses mesmos autores sugerem a busca por alternativas de solução quando os métodos de programação matemática exata tornam-se impraticáveis. Eles sugerem a utilização de métodos heurísticos, que são processos de pesquisa, aplicam-se estratégias e regras que oferecem resultados satisfatórios em um tempo computacional razoável. No entanto, não existe garantia de que a melhor solução encontrada seja a solução ótima global (BACHMATRUK; GARCIA-GONZALO; BORGES, 2015).

É evidente que, a depender das exigências do modelo, haverá a possibilidade de abandono de talhões e, com isso, uma redução no volume de madeira colhido, como ocorrido nos cenários do grupo 2 (Figura 2). Os efeitos volumétricos foram visíveis, quando empregada a restrição URM colheita em seu conceito puro, porém não sendo o mesmo para a restrição de adjacência clonal, o que evidencia a grande oportunidade de se formar uma paisagem mais resistente a ataque de pragas.

O volume médio, colhido nos cenários (grupo 1) sem restrição espacial, foi, em média, 0,64% superior, quando comparado com o grupo 3. No trabalho de Dong et al. (2015), não houve grandes diferenças de volume colhido, assim como o observado no presente estudo, porém sua aplicação ficou restrita à adjacência direcionada para a colheita. Fica evidente e complementar que a intensidade mínima de área de reforma pouco influenciou o volume colhido ao longo do HP (Figura 2). Contudo, neste caso, esses efeitos podem ser influenciados pelos modelos de crescimento e produção empregados do que,

realmente, uma solução no sentido combinatório, já que a qualidade do inventário florestal contínuo é um ponto importante na gestão das florestas.

Para a maioria dos cenários, verificou-se que o volume colhido, ao longo do HP, tornou-se constante a partir do terceiro ano do HP. Isso significa que a floresta caminha para a regulação e, neste caso, a floresta apresenta uma tendência de idade média próxima dos três anos de idade, o que disponibiliza uma maior volumetria a partir do terceiro ano do horizonte de planejamento. Segundo Leuschner (1984), floresta regulada é aquela em que há produções anuais ou periódicas de igual volume, tamanho ou qualidade, também, sendo associada ao compartimento em área colhido anualmente. Verifica-se que nenhuma floresta se torna totalmente regulada, em razão de aspectos econômicos de macro e microeconomia, como, ainda, ligados às questões de mercado.

Nos trabalhos de Binoti et al. (2014) e Dong et al. (2015), a adição de restrição espacial reduziu o valor da função objetivo. Gomide, Arce e Silva (2010), em seu trabalho, observou que a incorporação de restrições do tipo URM, também, reduziu a função objetivo, em 3,74%. Para este estudo, essa diferença não foi expressiva, a restrição de adjacência aplicada, no controle espacial dos clones, apresentou valores entre 0,12 a 0,23%, no grupo 3. Já o impacto maior foi entre os cenários com restrição de área mínima de reforma.

Com base nos resultados, constatou-se que a área mínima de reforma não influenciou a restrição de adjacência clonal, uma vez que os aumentos dos custos finais seguiram a mesma tendência, para os três grupos, o que demonstra a viabilidade desta aplicação. Contudo este fator é um item importante para o aumento nos custos finais do empreendimento.

A aplicação das restrições espaciais teve sucesso. A Figura 4 comprova a eficiência espacial do modelo. São notórias as diferenças entre a Figura 4a, 4b e 4c. Na Figura 4^a, não há parâmetros espaciais e, desta forma, os talhões são

colhidos com base apenas no planejamento tradicional. Na Figura 4b, os talhões adjacentes não são colhidos no mesmo HP. Já, na Figura 4c, observa-se a aplicabilidade da adjacência clonal, ao qual talhões selecionados para reforma não possuem o mesmo material genético adjacente e tem como consequência a redução de extensas áreas de plantio de um mesmo clone.

Estudos que trabalham com o conceito de *green up* (BOSTON; BETTINGER, 2001; STRIMBU; INNES; STRIMBU, 2010; ZHU; BEETINGER, 2008) têm sido amplamente discutidos na literatura e têm ganhado destaque. As restrições de adjacência do tipo URM são utilizadas em problemas de *green up*. Nesses casos, visam a questões relacionadas a impactos visuais sobre a paisagem, de forma exclusiva e, por conseguinte, à proteção e conservação das florestas.

O presente trabalho propôs uma nova aplicação deste tipo de restrição, que poderá auxiliar na construção de paisagens mais resistentes à propagação de doenças e patógenos. Observa-se, no Brasil, que o crescimento da eucaliptocultura é acompanhado com o aumento de ataques de pragas e doenças em plantios, assim, estratégias como a implementada neste estudo mostram-se aplicáveis. Ferreira (1989) recomendou evitar plantios, em larga escala, de procedências muito suscetíveis, para evitar o ataque contínuo e devastador de pragas e doenças. Como exemplo, a propagação da ferrugem (*Puccinia psidii*) que é de conhecimento mundial (COUTINHO et al., 1998) e, no Brasil, constitui uma das principais doenças da cultura do eucalipto (ALFENAS; DEMUNER; BARBOSA, 1989; FERREIRA, 1989), assim como o ataque o *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) (BRENNAN; WEINBAUM, 2001; PAINE et al., 2000), *Costalimaita ferruginea* (Fabricius, 1801) e *Costalimaita lurida* (LEFÉVRE, 1891) (MAFIA; MENDES, 2014), *Thaumastocoris peregrinus* (MUITITU et al., 2013) e lagartas desfolhados (Lepdopteras) (BITTENCOURT; BERTI FILHO, 2004).

De maneira geral, pragas e doenças do eucalipto podem causar perdas expressivas, em toda a cadeia produtiva, provocando reduções no crescimento e na produtividade, ou mesmo, a morte de mudas nos viveiros e de plantas no campo (MAFIA; MENDES, 2014). Todavia estudos envolvendo o custo dessas perdas, bem como a possibilidade de se verificar a real eficiência da proposta no campo, ainda, são escassos, carecendo, portanto de mais estudos. Um fato que pode gerar maior confiança é o aumento no número de clones a serem cultivados, propiciando maior resistência desses povoamentos. Espera-se que quanto maior o número de clones a serem cultivados, menor será o impacto no valor da função objetivo e nos resultados volumétricos produzidos, uma vez que aumentam as opções viáveis para a solução final.

Por fim, os resultados evidenciam que o uso da restrição de adjacência clonal é uma opção viável, mas não se deve descartar a aplicação na forma pura, quando requisitado. Para este estudo, o custo final no uso da aplicação proposta, em média, foi apenas 0,14% superior em relação ao planejamento tradicional, podendo considerá-lo desprezível, haja vista os benefícios. Essa proposta, além de apresentar uma função inovadora, pois reduz a existência de extensas áreas de plantio de um mesmo clone, também, pode apresentar um custo final reduzido, na produção da madeira, uma vez que o controle de pragas e doenças, muitas vezes, não é simulado dentro do planejamento florestal.

5 CONCLUSÕES

A restrição espacial do tipo URM colheita mostrou-se eficiente, na distribuição dos talhões, evitando que talhões adjacentes fossem colhidos em mesmo período do HP. No entanto, para a geração de solução factível, foi necessário permitir o abandono de talhões, o que não é desejável acontecer. O uso da restrição de adjacência clonal mostrou-se mais eficiente que a URM colheita.

Diante dos resultados, o uso da restrição de adjacência clonal pode ser considerado viável. Neste trabalho, seu custo médio foi 0,14% maior, aproximadamente, 86 mil reais, em relação ao planejamento tradicional.

Essa nova aplicação da restrição espacial URM, na qual se faz o controle espacial clonal, tem uma abordagem inovadora que poderá contribuir com a prevenção de proliferação de pragas e doenças, uma vez que reduz a existência de extensas áreas de plantio de um mesmo clone. Contudo, ainda, são necessários mais estudos, com o intuito de se verificar qual o real impacto do uso desta restrição para redução de custos com manejo de pragas e doenças nas florestas.

**SPACIALIZATION SILVICULTURAL OPTIMAL OF EUCALYPTUS
CLONES AND THEIR ECONOMIC EFFECTS ON FOREST PLANNING**

ABSTRACT

At present, a new concept of forest planning has become more popular, the space forest planning. In this system, the management unit or stand is seen more broadly with the analysis to its size, shape and distribution in relation to others. Models of Integer Linear Programming (ILP) using traditional planning restrictions, space restrictions of harvest URM (Unit Restriction Model) type and clonal adjacency restriction, a new URM application, were used to solve these problems. This study aimed to create a model of cost minimization using clonal adjacency clonal. The intention of this restriction is to reduce the size of homogeneous areas in eucalyptus forests and, as a result, to decrease the proliferation of pests and diseases as well as contribute in decision-making of forestry manager. The data processing was done based on ILP principles and created twelve scenarios that were differentiated by the nature of restrictions, space and non-space restrictions, and also volumetric restrictions and limit of areas to be reformed. The average volume harvested in the scenarios without space restriction was 0.64% higher in relation to that with space restrictions. The addition of space restriction reduced the value of objective function. In the scenarios with minimum reform area restriction, there were significant differences in costs. Scenarios with 50, 40 and 50% of reform area had an increase of 15, 11 and 8% in the final costs, respectively. The generated maps showed, in landscape matrix, the efficiency of space restrictions application. The application of clonal adjacency restriction presented be better than the traditional URM to the harvest, with the cost closely to traditional planning, just 0.14% higher, which proves the viability of its application in the context of pests and diseases proliferation, emerging as a potential tool to reduce costs of the pest management.

Key words: Spatial planning. URM restriction. Forest pests.

REFERÊNCIAS

- ALFENAS, A. C.; DEMUNER, N. L.; BARBOSA, M. M. A ferrugem e as opções de controle. **Correio Agrícola**, São Paulo, n. 1, p. 18-20, 1989.
- ALONSO, L. R. L. **O problema da consideração de restrições de adjacência em um planejamento florestal**. 2003. 114 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2003.
- BACHMATIUK, J.; GARCIA-GONZALO, J.; BORGES, J. G. Analysis of the performance of different implementations of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling. *Silva Fennica*, Helsinki, v. 49, n. 4, p. 01-18, 2015.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: a review. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 188, v. 2/4, p. 145-173, Nov. 2005.
- BERTOMEU, M.; ROMERO, C. Managing forest biodiversity: a zero-one goal programming approach. **Agricultural Systems**, Essex, v. 68, n. 3, p. 197-213, June 2001.
- BETTINGER, P. et al. A prototype method for integrating spatially-referenced wildfires into a tactical forest planning model. **Research Journal of Forestry**, Oxford, v. 4, n. 3, p. 158-172, 2010.
- BINOTI, D. H. B. et al. Inclusion and effect of spatial characteristics on models of forest regulation. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 157-164, jan./ mar. 2014.
- BITTENCOURT, M. A. L.; BERTI FILHO, E. Exigências térmicas para o desenvolvimento de *Palmistichus elaeisis* (Hymenoptera, Eulophidae) em pupas de cinco espécies de lepidópteros. **Iheringia**, Porto Alegre, v. 94, n. 3, p. 321-323, 2004.
- BORGES, P.; BERGSENG, E.; EID, T. Adjacency constraints in forestry-a simulated annealing approach comparing different candidate solution generators. **Mathematical and Computational Forestry & Natural Resource Sciences**, Norwegian, v. 6, n. 1, p. 11, 2014b.
- _____. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 233, n. 3, p. 700-710, Mar. 2014a.

BORGESA, J. G.; HOGANSON, H. M. Structuring a landscape by forestland classification and harvest scheduling spatial constraints. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 130, n. 1/3, p. 269-275, May 2000.

BOSTON, K.; BETTINGER, P. An analysis of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems. **Forest Science**, Bethesda, v. 45, n. 2, p. 292-301, May 1999.

_____. An economic and landscape evaluation of the green-up rules for California, Oregon, and Washington (USA). **Forest Policy and Economics**, Amsterdam, v. 8, n. 3, p. 251-266, Apr. 2006.

_____. Development of spatially feasible forest plans: a comparison of two modelling approaches. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 35, n. 4, p. 425-435, 2001.

BRENNAN, E. B.; WEINBAUM, S. A. Stylet penetration and survival of three psyllid species on adult leaves and 'waxy' and 'de-waxed' juvenile leaves of *Eucalyptus globulus*. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, Dordrecht, v. 100, n. 3, p. 355-363, Sept. 2001.

BRUMELLE, S. et al. A tabu search algorithm for finding good forest harvest schedules satisfying green-up constraints. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 106, n. 2/3, p. 408-424, Apr. 1998.

BURCKHARDT, D.; QUEIROZ, D. L. Checklist and comments on the jumping plant-lice (Hemiptera: Psylloidea) from Brazil. **Zootaxa**, Basel, v. 3571, p. 26-48, 2012.

CAMARGO, J. M. M. et al. Resistência de clones de *Eucalyptus* ao psilídeo-de-concha. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 77, p. 91-97, jan./mar. 2014.

CASTRO, R. R. **Regulação de florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

COUTINHO, T. A. et al. *Eucalyptus* rust: a disease with the potential for serious international implications. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 82, n. 7, p. 819-825, July 1998.

_____. International implications. **Plant Disease**, Saint Paul, v.82, n.7, p.819-925, 1998.

DAVIS, L. S. et al. (Ed.). **Forest management**. New York: McGraw Hill, 2000. 790 p.

DONG, L. et al. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: a case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 356, p. 124-135, Nov. 2015.

FERREIRA, F. A. Ferrugem do eucalipto. In: SOCIEDADE DE INVESTIGAÇÕES FLORESTAIS. **Patologia florestal: principais doenças florestais no Brasil**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1989. p. 129-146.

FISCHER, D. T.; CHURCH, R. L. Clustering and compactness in reserve site selection: an extension of the biodiversity management area selection model. **Forest Science**, Bethesda, v. 49, n. 4, p. 555-565, 2003.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 85 p. (Dissertação em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Comparação entre a meta-heurística *Simulated Annealing* e a programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrição de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449-460, abr./jun. 2013.

_____. Efeito das restrições espaciais de adjacência no planejamento florestal otimizado. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 3, p. 573-584, jul./set. 2010.

HEINONEN, T. **Developing spatial optimization in forest planning**. 2007. 48 p. Dissertation (Agriculture and Forestry) - University of Joensuu, Joensuu, 2007.

HEINONEN, T.; PUKKALA, T. A comparison of one-and two-compartment neighbourhoods in heuristic search with spatial forest management goals. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 38, n. 3, p. 319-332, 2004.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives- discussion and 76 synthesis. **Forest Science**, Bethesda, v. 18, n. 1, p. 01-31, 1977.

LANA, V. M. et al. Survival and dispersal of *Puccinia psidii* spores in eucalypt wood products. **Australasian Plant Pathology**, Austrália, v. 41, n. 3, p. 229-238, 2012.

LEUSCHNER, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Willey & Sons, 1984. 298 p.

MAFIA, R. G.; MENDES, J. E. P. Surtos e danos causados pelos besouros esfolhadores *Costalimaita ferruginea* (Fabricius, 1801) e *Costalimaita lurida* (Lefèvre, 1891)(Coleoptera: Chrysomelidae) em plantios de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 829-836, 2014.

MARTINS, I. et al. Modeling target volume flows in forest harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Top**, Madrid, v. 22, n. 1, p. 343-362, Apr. 2014.

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. 2002a.

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, 2002b.

MURRAY, A. T.; WEINTRAUB, A. Scale and unit specification influences in harvest scheduling with maximum area restrictions. **Forest Science**, Bethesda, v. 48, n. 4, p. 779-789, 2002.

MUTITU, E. K. et al. Biology and rearing of *Cleruchoides noackae* (Hymenoptera: Mymaridae), an egg parasitoid for the biological control of *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae). **Journal of Economic Entomology**, Oxford, v. 106, n. 5, 1979–1985, Oct. 2013.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, out./dez. 2011.

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.

ÖHMAN, K.; LÄMÅS, T. Clustering of harvest activities in multi-objective long-term forest planning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 176, n. 1, p. 161-171, 2003.

ÖHMAN, K.; LÄMÅS, T. Reducing forest fragmentation in long-term forest planning by using the shape index. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 212, n. 1, p. 346-357, 2005.

PAINE, T. D. et al. UC scientists apply IPM techniques to new eucalyptus pest. **California Agriculture**, Berkeley, v. 54, n. 6, p. 8-13, 2000.

PEREIRA, J. M. et al. Registro de *Leptocybe* invasora no estado de Goiás. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 10, p. 1721-1724, out. 2014.

PUKKALA, T. et al. Relationships between economic profitability and habitat quality of Siberian jay in uneven-aged Norway spruce forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 276, p. 224-230, July 2012.

PUKKALA, T.; HEINONEN, T. Optimizing heuristic search in forest planning. **Nonlinear Analysis: real world applications**, Oxford, v. 7, n. 5, p. 1284-1297, 2006.

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

QUEIROZ, D. L. et al. Predicting the geographical distribution of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera:Psylloidea) in Brazil. **Australian Journal of Entomology**, Canberra, v. 52, n. 1, p. 20-30, Feb. 2013.

REIS, A. et al. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 497-505, out./dez. 2012.

SAAVEDRA, M. C.; WITHERS, T. M.; HOLWELL, G. I. Susceptibility of four *Eucalyptus* host species for the development of *Thaumastocoris peregrinus* Carpintero and Dellapé (Hemiptera: Thaumastocoridae). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 336, p. 210-216, Jan. 2015.

SHAN, Y. et al. Trends in spatial forest planning. **Mathematical and Computational Forestry & Natural Resource Sciences**, Norwegian, v. 1, n. 2, p. 86-112, 2009.

SILVA, P. H. M. et al. Selecting for rust (*Puccinia psidii*) resistance in *Eucalyptus grandis* in São Paulo State, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 303, p. 91-97, 2013.

STRIMBU, B. M.; INNES, J. L.; STRIMBU, V. F. A deterministic harvest scheduler using perfect bin-packing theorem. **European Journal of Forest Research**, Amsterdam, v. 129, n. 5, p. 961-974, Sept. 2010.

TÓTH, S. et al. A strengthening procedure for the path formulation of the area-based adjacency problem in harvest scheduling models. *Math.* **Mathematical and Computational Forestry & Natural Resource Sciences**, Norwegian, v. 4, n. 1, p. 27-49, 2012.

TÓTH, S. et al. Promoting large, compact mature forest patches in harvest scheduling models. **Environmental Modeling & Assessment**, Washington, v. 13, n. 1, p. 01-15, Feb. 2008.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, set./out. 2009.

TRUGILHO, P. F. et al. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TUMURA, K. G.; DE PIERI, C.; FURTADO, E. L. Murcha por *Ceratocystis* em eucalipto: avaliação de resistência e análise epidemiológica. **Summa Phytopathologica**, Jaguariúna, v. 38, n. 1, p. 54-60, 2012.

ZANUNCIO, J. C. et al. **Hemípteros predadores de lagartas desfolhadoras de eucalipto**: manual de pragas em floresta: biologia, ecologia e controle (1). Viçosa: IPEF, 1993. 140 p.

ZHU, J.; BETTINGER, P. Estimating the effects of adjacency and green-up constraints on landowners of different sizes and spatial arrangements located in the southeastern US. **Forest Policy and Economics**, Amsterdam, v. 10, n. 5, p. 295-302, Apr. 2008.