

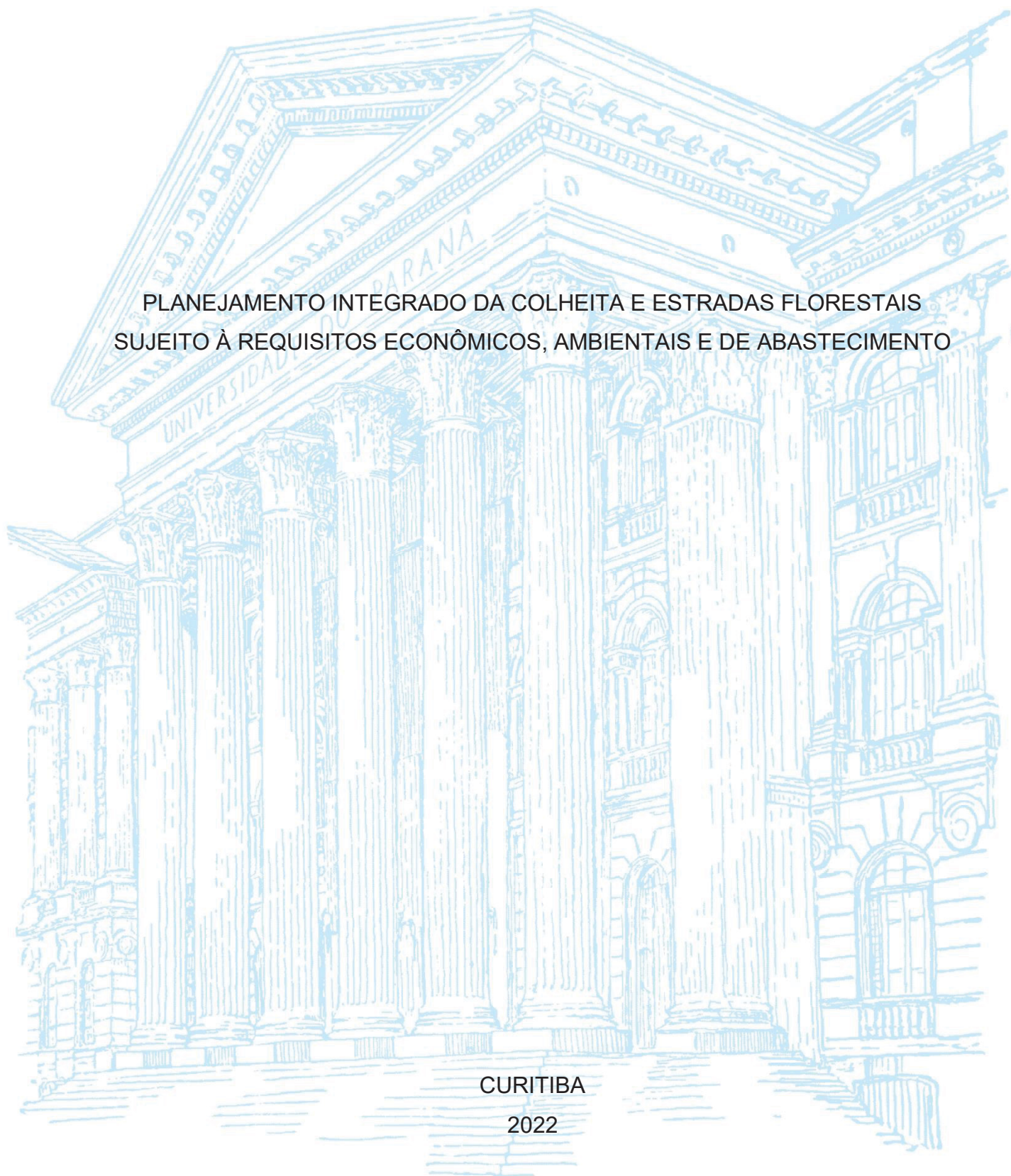
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LINAMARA SMANIOTTO FERRARI

PLANEJAMENTO INTEGRADO DA COLHEITA E ESTRADAS FLORESTAIS
SUJEITO À REQUISITOS ECONÔMICOS, AMBIENTAIS E DE ABASTECIMENTO

CURITIBA

2022



LINAMARA SMANIOTTO FERRARI

PLANEJAMENTO INTEGRADO DA COLHEITA E ESTRADAS FLORESTAIS
SUJEITO À REQUISITOS ECONÔMICOS, AMBIENTAIS E DE ABASTECIMENTO

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari
Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

CURITIBA

2022

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Ferrari, Linamara Smaniotto

Planejamento integrado da colheita e estradas florestais sujeito à requisitos econômicos, ambientais e de abastecimento / Linamara Smaniotto Ferrari. - Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientadores: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 13/04/2022. Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Florestas - Manejo - Planejamento. 2. Madeira - Exploração - Planejamento. 3. Estradas Florestais - Planejamento. 4. Florestas - Manejo - Modelos matemáticos. 5. Florestas - Manejo - Programação linear. 6. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Pelissari, Allan Libanio. III. Scarpin, Cassius Tadeu. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.62

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga - CRB 9/424



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LINAMARA SMANIOTTO FERRARI** intitulada: **PLANEJAMENTO INTEGRADO DA COLHEITA E ESTRADAS FLORESTAIS SUJEITO À REQUISITOS ECONÔMICOS, AMBIENTAIS E DE ABASTECIMENTO**, sob orientação do Prof. Dr. JULIO EDUARDO ARCE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Abril de 2022.

Assinatura Eletrônica

15/04/2022 21:48:23.0

JULIO EDUARDO ARCE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

16/04/2022 11:27:01.0

ARINEI CARLOS LINDBECK DA SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

15/04/2022 19:02:26.0

HÉCTOR CANCELA

Avaliador Externo (UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA, URUGUAY)

Assinatura Eletrônica

15/04/2022 03:05:33.0

ANDREY LESSA DERCI AUGUSTYNICZIK

Avaliador Externo (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED
SYSTEM ANALYSIS)

Assinatura Eletrônica

14/04/2022 14:29:20.0

GUSTAVO VALENTIM LOCH

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Avenida Lothário Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 80210-170 - Tel: (41) 3360-4212 - E-mail: pgfloresta@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 174838

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 174838

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha mãe Judite e meu pai Celito, que sempre contribuíram para a minha educação, apoiando e incentivando minhas decisões. Jamais poderei chegar perto de agradecer todo amor e dedicação que recebi e recebo de vocês. Obrigada por tudo.

Agradeço à minha irmã Laiana, “meu pedacinho de mim”, por sempre estar por perto me ouvindo, aconselhando e compartilhando momentos. Mesmo que a distância geográfica nos separe, nossa conexão e amor continuam inabaláveis.

Agradeço ao meu marido Jacques Matsui, por continuamente me inspirar e incentivar a evoluir como pessoa e como profissional, sempre acreditando em mim e me dando forças para seguir em frente.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Julio Eduardo Arce, pela nobre orientação e ensinamentos desde o meu mestrado. Você é um exemplo a ser seguido e sinto-me muito honrada por todo aprendizado que tive com você.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari, pela contínua atenção, incentivo e disposição para me ouvir, ajudar, corrigir e compartilhar ensinamentos valiosos desde o meu mestrado.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin pelo ensinamento e aprofundamento dos meus conhecimentos relacionados à Pesquisa Operacional, que tiveram papel relevante para a realização desse e de futuros trabalhos.

Agradeço à minha amiga Renata Naoko Correa, que por intermédio do Prof. Cassius, nos escalou como dupla de uma matéria de Programação Linear Inteira Mista e essa parceria permanece até hoje com valiosas trocas de experiências e contribuições imensuráveis. Nossas discussões e suas contribuições foram essenciais para a realização desse trabalho. Agraço também a minha amiga Tamires Sfeir, que através do seu exemplo e determinação, me incentivou a me aprofundar na Pesquisa Operacional e, bem como, a conquistar novos conhecimentos.

Agradeço à minha família Curitibana do “AP 31”, Amanda Köche Marcon, Myrcia Minatti e Mirella Basileu de Oliveira Lima. Meninas mais que especiais que Deus colocou no meu caminho e que me mostraram o poder de uma amizade. Cada uma com seu jeito especial de ser e que me proporcionaram muitos momentos de alegria e aprendizados.

Agradeço aos amigos Deivison Venicio Souza e Joielan Xipaia dos Santos, os quais admiro tanto e que contribuíram, com seus bons exemplos, na minha evolução pessoal e profissional. Agradeço também aos amigos Vinícius Moraes Coutinho, Jonathan William Trautenmüller, Jorge Zea Camaño, Franciele Alba da Silva, Cristine Tagliapietra Schons, Thiago Wendling Gonçalves de Oliveira, Luani Rosa Piva, Bruna Nascimento de Vasconcellos Schiavo e dentre outros que o mestrado e o doutorado me presentearam.

Agradeço à empresa de base florestal que possibilitou a execução dos estudos de caso desse trabalho. Em especial, agradeço ao Elias e ao Sérgio pela contínua atenção e ajuda que me proporcionaram.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná, à Pós-Graduação em Engenharia Florestal e a todos professores que contribuíram com a evolução do meu aprendizado e experiências ao longo dessa jornada.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos.

Por fim, meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

***“Uma coisa está nas suas mãos,
o poder de ser o melhor que você pode ser.”***

Haroldo Dutra Dias

RESUMO

Os problemas táticos de planejamento florestal que integram decisões de colheita florestal e planejamento de estradas normalmente tratam da alocação espaço-temporal das atividades de manejo em uma paisagem. Tais atividades podem levar a diferentes influências no processo produtivo e nos impactos ambientais de uma floresta, tornando esse planejamento uma etapa importante para a tomada de decisão. Apesar dos avanços na solução de problemas que integram o planejamento da colheita com o planejamento de estradas, há poucos documentos que incluem restrições ambientais e de agregação de áreas de corte. Dessa maneira, o presente estudo propõe como objetivo geral implementar e analisar modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) em um estudo de caso que integra decisões de agendamento de colheita e estradas florestais, com enfoque em considerações de abastecimento, bem como econômicas e ambientais. Diferentes definições de vizinhança entre talhões florestais foram testadas para enumerar os blocos de colheita, integrando requisitos de limites mínimo e máximo de tamanho de bloco de colheita, idade de corte, alocação de blocos de colheita, alocação de estradas de acesso aos povoamentos e restrições ambientais de corte. Além do mais, foram implementados diferentes planos com objetivo de maximizar a receita de um planejamento integrado de agendamento de colheita e estradas sujeito à diferentes prescrições de agregação de blocos de colheita e restrições ambientais. Para enumerar os blocos de colheita, os blocos foram gerados *a priori* a partir da aplicação do algoritmo Girvan-Newman, marcando, porventura, a primeira aplicação deste algoritmo na literatura florestal. A metodologia aplicada neste estudo permitiu resolver problemas de planejamento tático florestal para colheita e estradas, integrando questões econômicas e ambientais, que resultaram em menos de 3 horas de processamento computacional. Os resultados demonstraram que, quanto maior a distância de vizinhança considerada entre dois talhões para enumerar os blocos, maior foi o retorno econômico e maior o percentual de designação de áreas de corte. Além do mais, constatou-se que, quanto maior a distância de vizinhança entre dois talhões, maior o tamanho médio de blocos, assim como, menor o custo de manutenção das estradas. Em contrapartida, quando considerados diferentes níveis de agregação entre blocos de colheita, percebeu-se que, quanto mais agregado, menos flexível se torna o modelo matemático, tendendo a redução de áreas agendadas e menor retorno econômico. Apesar da redução da rentabilidade, outros benefícios monetários resultantes da aplicação dessa abordagem podem ser obtidos em operações subsequente que não foram considerados neste estudo. Além disso, melhorias nos modelos apresentados podem ser aplicadas, como através da flexibilização das restrições de idade, de maneira que o modelo matemático seja capaz de ampliar as alternativas de seleção de áreas de corte.

Palavras-chave: Programação Linear Inteira Mista 1. Algoritmo Girvan-Newman 2. Blocos de colheita 3. Planejamento tático 4.

ABSTRACT

Tactical forest planning problems that integrate forest harvesting decisions and road planning typically deal with the spatio-temporal allocation of management activities in a landscape. Such activities can lead to different influences on the production process and environmental impacts, making this planning an important step for decision making. Despite advances in solving problems that integrate harvest planning with road planning, there are few documents that include environmental restrictions and cut area aggregation. Therefore, the present study proposes to implement and analyze Mixed Integer Linear Programming (MILP) models in a case study that integrates harvest scheduling decisions and forest roads planning, focusing on supply, economic and environmental considerations. Different definitions of the neighborhood between forest stands were analyzed to enumerate the harvest clusters, integrating requirements for minimum and maximum harvest cluster size limits, cutting age, allocation of harvest blocks, allocation of access roads to stands, and environmental concerns. Furthermore, different plans were implemented to maximize revenue from an integrated harvest and road scheduling planning subject to different harvest cluster aggregation prescriptions and environmental constraints. The harvest clusters were enumerated a priori from the application of the Girvan-Newman algorithm, marking, perhaps, the first application of this algorithm in the forestry literature. The methodology applied in this study allowed solving problems of tactical forestry planning for harvesting and roads, integrating economic and environmental issues, which resulted in less than 3 hours of computational processing. The results showed that the greater the neighborhood distance considered between two stands, the greater economic return, and percentage of designation of cut areas. Furthermore, the study shows that the greater distance between two stands, the greater the average cluster size, as well as the lower road maintenance cost. On the other hand, considering different levels of aggregation between harvesting clusters resulted in less flexibility in the mathematical model, tending to reduce scheduled areas and economic returns. Despite the profitability decreased, other monetary benefits resulting from the application of this approach can be obtained in subsequent operations that were not considered in this study. In addition, improvements in the models presented can be applied, such as by relaxing age constraint, in order to mathematical model be able to expand the alternatives for selecting cutting areas.

Keywords: Mixed Integer Linear Programming 1. Girvan-Newman algorithm 2. Harvest cluster 3. Tactical planning 4.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - PROCEDIMENTO PARA ENUMERAR OS AGRUPAMENTOS FLORESTAIS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DE TAMANHO E IDADE.	23
FIGURA 1.2 - DISTRIBUIÇÃO INICIAL DAS CLASSES DE IDADE DA FLORESTA DE ESTUDO.	27
FIGURA 1.3 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL INICIAL DAS CLASSES DE IDADE DA FLORESTA DE ESTUDO.	28
FIGURA 2.1 - PERCENTUAL DE ÁREA POR IDADE (ANOS) DISPONÍVEL PARA SER AGENDADA PELOS MODELOS MATEMÁTICOS CONFORME AS DIFERENTES ABORDAGENS DE FORMAÇÃO DE BLOCOS DE COLHEITA.	44
FIGURA 2.2 - PERCENTUAL DE VOLUME DE CORTE POR SORTIMENTO ANO. .	46
FIGURA 2.3 - ÁREA DA FLORESTA DO ESTUDO DE CASO MOSTRANDO OS BLOCOS DE COLHEITA SELECIONADOS E NÃO SELECIONADOS AO LONGO DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.	49
FIGURA 3.1 - REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO PROBLEMA.	62
FIGURA 3.2 - RESUMO PERCENTUAL GERAL DE DESIGNAÇÃO DE ÁREA PLANEJADA POR CENÁRIO.	70
FIGURA 3.3 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DO VOLUME POR SORTIMENTO AGENDADO AO LONGO DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO PARA CADA CENÁRIO.	71
FIGURA 3.4 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS DE CORTE DE CADA CENÁRIO AO LONGO DO PERÍODO DE CINCO ANOS.	72
FIGURA 3.5 - DISTÂNCIA DE SEGMENTO E TIPO DE ESTRADAS DESIGNADAS POR CENÁRIO.	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - CENÁRIOS TESTADOS.	42
TABELA 2.2 - NÚMERO TOTAL DE BLOCOS DE COLHEITA CONFORME AS DIFERENTES DEFINIÇÕES DE VIZINHANÇA ENTRE TALHÕES. ...	43
TABELA 2.3 - DISPOSIÇÃO RELATIVA DAS ÁREAS DE COLHEITA POR CENÁRIO.	44
TABELA 2.4 - SOLUÇÕES OBTIDAS A PARTIR DA EXECUÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE OTIMIZAÇÃO PARA TODOS OS CENÁRIOS.	48
TABELA 2.5 - PANORAMA DOS BLOCOS SELECIONADOS EM CADA CENÁRIO OTIMIZADO.	50
TABELA 3.1 - VISÃO GERAL DOS CENÁRIOS DE OTIMIZAÇÃO.	68
TABELA 3.2 - RESULTADO DE OTIMIZAÇÃO PARA TODOS OS CENÁRIOS.	69

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ARM	- <i>Area Restriction Model</i>
MILP	- Mixed-Integer Linear Programming
PL	- Programação Linear
PLIM	- Programação Linear Inteira Mista
VPL	- Valor Presente Líquido
SIG	- Sistema de Informações Geográfica

SUMÁRIO

1 ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA	16
1.1 INTRODUÇÃO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
1.4 MATERIAL E MÉTODOS GERAL	21
1.4.1 Formação dos blocos de colheita.....	21
1.4.1.1 Definição de vizinhança entre talhões	21
1.4.1.2 Geração e seleção de blocos de colheita	23
1.4.2 Definição do conjunto de estradas florestais	25
1.4.3 Estudo de caso.....	26
REFERÊNCIAS.....	29
2 CAPÍTULO 1 - PLANEJAMENTO INTEGRADO DE COLHEITA FLORESTAL E	
ESTRADAS, CONSIDERANDO REQUISITOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS....	32
RESUMO.....	32
2.1 INTRODUÇÃO	32
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	36
2.2.1 Formulação matemática	37
2.2.2 Estudo de caso.....	40
2.3 RESULTADOS	42
2.4 DISCUSSÕES	50
2.5 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS.....	54
3 CAPÍTULO 2 – AGREGAÇÃO DE BLOCOS DE COLHEITA FLORESTAL	
SUJEITO À CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS E AMBIENTAIS.....	58
RESUMO.....	58
3.1 INTRODUÇÃO	58
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	61
3.2.1 Formulação matemática	63
3.2.2 Estudo de caso.....	68
3.3 RESULTADOS	68

3.4 DISCUSSÃO	73
3.5 CONCLUSÃO.....	75
3.6 REFERÊNCIAS.....	76
4 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS GERAIS	81
APÊNDICE 1 – FORMAÇÃO DA REDE DE ESTRADAS	86

1 ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

A tomada de decisão no manejo florestal é uma tarefa altamente desafiadora, uma vez que envolve diferentes componentes da floresta que se inter-relacionam; bem como, requer, em muitos casos, que valores sociais e ambientais sejam considerados em um mesmo plano, impactando diretamente no retorno da produção da madeira (MCDILL, 1999, BASKENT; KELES, 2005). No entanto, relacionar diferentes alternativas de gestão, que considerem a estrutura e o padrão da floresta ao longo dos anos, torna-se uma prática quase inatingível sem o uso de métodos matemáticos. O uso de técnicas matemáticas possibilita que planejadores resolvam problemas complexos que abrangem diferentes objetivos e horizontes temporais (MCDILL, 1999), fundamental para a sustentabilidade dos empreendimentos florestais.

Desde as décadas de 1960, datam as primeiras aplicações de pesquisa operacional no manejo florestal (BUONGIORNO; GILLESS, 2003, RÖNNQVIST et al., 2015). A partir de então, têm-se desenvolvido modelos de planejamento mais sofisticados com base em técnicas matemáticas, incluindo Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira Mista (PLIM), simulação e heurística (MCDILL, 2014). No entanto, a aplicação dessas técnicas não se limita em apenas permitir que planejadores encontrem soluções para problemas complexos, mas possibilita também que diferentes abordagens sejam confrontadas (MCDILL, 2014). Ou seja, a partir dessas aplicações, permite-se que planejadores e tomadores de decisão consigam analisar e julgar os impactos de eventuais escolhas, possibilitando que haja:

- Redução dos riscos relacionados à produção sustentável de produtos ao longo de um período;
- Limitação de custos de oportunidade referentes à compra de matéria prima do mercado;
- Minimização de perdas econômicas pertinentes às pausas no processo produtivo competentes ao tempo de deslocamento das frentes de trabalho;
- Maximização da lucratividade;

- Minimização dos impactos ambientais relativos às atividades florestais; dentre outros.

O sucesso da aplicação de técnicas matemáticas em problemas reais, no entanto, está diretamente relacionado ao nível de adequação dos objetivos reais transcritos ao problema matemático. Por essa razão, planejadores e tomadores de decisão devem ter um entendimento claro do problema para serem capazes de transcrevê-lo de maneira matematicamente precisa e simples (BUONGIORNO; GILLESS, 2003). Além do mais, a formulação matemática deve estar alinhada a aplicação de técnicas que consigam garantir uma solução dentro de um período pertinente a obtenção de uma resposta.

O tempo razoável de processamento de um modelo varia de acordo com o tipo e o tamanho do problema, para que assim seja definida a melhor técnica a ser aplicada. Nos planejamentos florestais operacionais, por exemplo, tradicionalmente, são implementadas heurísticas, meta-heurísticas e métodos de rede para a resolução de problemas, uma vez que requerem respostas imediatas (minutos) e de maior nível de detalhamento. Enquanto em planos estratégicos e táticos comumente são empregados a programação linear inteira mista e métodos de programação estocástica (RONNQVIST, 2003, D'AMOURS; EPSTEIN; RONNQVIST, 2011), dado que essas metodologias podem garantir a otimalidade ou a proximidade desta, porém, a um maior custo de processamento computacional.

Nos planos estratégicos, são definidas a organização sustentável dos recursos e a capacidade de produção de longo prazo. Enquanto no planejamento tático, por exemplo, são definidos planos de médio prazo e maior nível de detalhamento das atividades estabelecidas no plano estratégico. Nessa etapa são determinadas prescrições de onde, quando e quanto colher e quais estradas construir ou manter para acessar as unidades de manejo. No entanto, essas decisões de manejo estão atreladas com a sustentabilidade ecológica e econômica do recurso, podendo ocasionar diferentes influências no processo de produção e impactos ambientais de uma floresta (ROSS; TÓTH, 2016). Portanto, o agendamento de áreas de colheita ao longo do tempo associado às decisões rodoviárias requer um gerenciamento cuidadoso em um ambiente multiuso (RÖNNQVIST et al., 2015, MOBTAKER et al., 2018).

Quando considerada a sustentabilidade ecológica em problemas de agendamento de colheita florestal, as práticas de manejo tendem a não ser triviais.

Isso porque, a promoção de grandes áreas de corte raso pode aumentar a exposição solar, reduzir a umidade local, aumentar o risco de danos causados pelo vento, promover a erosão do solo, diminuir a qualidade da água, deteriorar a paisagem natural (GUSTAFSSON et al., 2012, ROSS; TÓTH, 2016, MOBTAKER et al. al., 2018) e afetar severamente algumas espécies (ROSS; TÓTH, 2016). Ao passo que há espécies que se beneficiam de paisagens ricas em bordas e fragmentadas, além de que a abertura de espaços gerados pela colheita possibilita a redução de risco de incêndios florestais e propagação de doenças e infecções (RÖNNQVIST et al., 2015).

Apesar da dificuldade de se estabelecer um padrão das melhores práticas capazes de minimizar os impactos ecológicos, uma das restrições mais usadas em problemas de planejamento de colheita é a aplicação de restrições de adjacência e de *green-up* (SHAN ET AL., 2009; DONG ET AL., 2015). As restrições de adjacência limitam que extensas áreas de floresta sejam cortas sequencialmente e restringem que áreas vizinhas sejam colhidos simultaneamente (MCDILL et al., 2016; RÖNNQVIST et al., 2015). Enquanto as restrições de *green-up* controlam um período mínimo de tempo antes que as áreas adjacentes possam ser colhidas (DONG et al., 2015). No entanto, quando incorporadas tais restrições em um planejamento podem tornar as técnicas de solução do problema ainda mais difíceis de resolver, uma vez que se caracterizam como um problema combinatorial.

Durante as décadas de 1960 e 1970 e, em alguns casos, ainda hoje, modelos de planejamento tático de colheita florestal e de estradas são elaborados em duas etapas sequencialmente vinculadas (GUIGNARD; RYU; SPIELBERG, 1998), devido à complexidade de resolução do problema. Na primeira etapa, o modelo de programação de colheita florestal identifica as áreas que serão colhidas e, após esse estágio, um modelo que minimiza os custos das estradas define os acessos às áreas de corte (BORGES et al., 2014^a). No entanto, considerar as decisões de estradas após a otimização do planejamento da colheita tende a resultar em maiores custos gerais de colheita e transporte (ROSS; TÓTH; JAROSS, 2018). Essa abordagem é incapaz de reconhecer que eventuais aumentos nos custos da colheita, devido a mudanças de local de corte, podem resultar em expressiva redução dos custos de estradas e impactar em melhores resultados econômicos para o planejamento como um todo (BORGES et al., 2014a).

Weintraub e Navon (1976) e Kirby et al. (1986) apresentaram um dos primeiros modelos de planejamento integrado de colheita e estradas da literatura

florestal, os quais demonstraram os benefícios dessa abordagem em comparação a resolução do problema em duas etapas sequenciais. Desde então, muitos esforços têm sido aplicados na literatura para otimizar problemas de planejamento integrado de colheita e rede de estradas. Como por exemplo, Ross et al. (2018) formularam um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolver um problema integrado de colheita e estradas usando a funcionalidade de uma formulação de Modelo II (JOHNSON; SCHEURMAN, 1977) e de restrições gatilho para assumir indicadores de colheita binária sempre que uma quantidade mínima de área fosse programada. Bellavenutte et al. (2020) implementaram uma abordagem híbrida, que subdivide um grande problema de planejamento tático integrado em subproblemas menores, os quais foram resolvidos de maneira iterativa por meio da combinação de PLIM com um procedimento heurístico. Andalaft et al. (2003) apresentaram a aplicação de um pequeno problema de PLIM integrando o planejamento de colheita florestal e a projeção de rede de estradas que considera área mínima de colheita. Nesse modelo, os autores aplicaram estratégias de solução envolvendo o fortalecimento do modelo, içamento de algumas restrições e a aplicação do relaxamento Lagrangeano para decompor o problema em componentes mais simples. Ademais, Chung et al. (2012) apresentaram uma ferramenta analítica baseada em heurísticas que auxilia o planejamento espacial da colheita e estradas, possibilitando atender restrições de volume, de adjacência e de diferentes sortimentos de madeira.

No entanto, apesar dos expressivos avanços obtidos na solução de problemas de planejamento integrado, poucos trabalhos têm abordado o planejamento integrado combinado com restrições de agregação e restrições ambientais. As restrições ambientais tradicionalmente lidam com problemas de natureza combinatória para formação dos blocos de colheita e limitações de corte, além de que, o planejamento do tipo integrado tende a trabalhar com muitas variáveis de decisão do tipo binária. Com isso, ambas abordagens tendem a lidar com problemas extremamente grandes e exigir uma quantidade razoável de processamento, tornando-as complexas de resolução.

Diante da lacuna exposta, a presente pesquisa teve como motivação aplicar e analisar abordagens de PLIM que resolvam problemas de planejamento tático integrado de colheita e estradas florestais com perspectivas econômicas, ambientais e de abastecimento. Além de que, este estudo visa testar diferentes definições de vizinhança entre talhões para formação de blocos de colheita e integrar requisitos de:

idades e tamanhos mínimo e máximo para a formação de blocos, alocação de blocos de colheita, alocação de estradas de acesso a esses blocos, restrições ambientais e agregação de áreas de corte.

Devido à complexidade de problemas que envolvem a conectividade de áreas, como no caso de formação de blocos de colheita, torna-se útil a aplicação de modelos alternativos que promovam, mas não garantam, a conectividade das áreas de colheita, possibilitando a obtenção de respostas adequadas em tempos de processamento aceitáveis (AUGUSTYNICZIK; ARCE; SILVA, 2016). Dessa maneira, aplicou-se neste estudo o algoritmo de Girvan-Newman para gerar blocos de colheita viáveis *a priori* da execução dos modelos matemáticos, caracterizando a aplicação desse algoritmo como inédita na literatura florestal.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

A presente tese tem como objetivo geral a otimização do planejamento tático, integrando decisões relacionadas à colheita e estradas florestais, focadas em considerações de abastecimento, econômicas e ambientais.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral dessa pesquisa seja alcançado, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Propor uma metodologia de definição de vizinhança entre talhões, visando a criação de blocos de colheita que respeitem a limitação de área e idade mínima e máxima;
- b) Propor um modelo matemático que maximize o retorno de um planejamento tático integrado de colheita e estradas, que considere blocos de colheita, diferentes definições de vizinhança entre talhões para formação de blocos, e restrições ambientais;
- c) Propor um modelo matemático que maximize o retorno de planejamento tático que integre o agendamento da colheita e estradas e considere a agregação de blocos de colheita e restrições ambientais;

- d) Avaliar os impactos da espacialização dos modelos quanto ao uso de diferentes definições de vizinhança entre talhões;
- e) Analisar os impactos da restrição ambiental no retorno dos modelos matemáticos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo é composto por quatro seções. A primeira seção é composta por uma introdução geral referente a temática discutida, os objetivos do estudo e o material e métodos geral utilizado nas demais seções desta tese. O material e métodos dessa seção apresenta tópicos como a formação dos blocos de colheita, a definição do conjunto de estradas florestais e a apresentação do estudo de caso, os quais serão utilizados nos capítulos subsequentes.

O Capítulo 1, ou segunda seção, apresenta e discute a implementação de um modelo matemático que maximiza o retorno financeiro de abastecimento de uma fábrica e utiliza diferentes definições de vizinhança entre talhões para a formação de blocos de colheita. Além disso, nessa etapa são analisados os impactos espaciais e econômicos da aplicação de restrições ambientais nos cenários testados.

Em contrapartida, o Capítulo 2, ou terceira seção, apresenta e discute o uso de um modelo que maximiza o retorno financeiro para o abastecimento de madeira de uma fábrica, o qual trabalha com restrições de agregação de áreas de colheita dentro de um mesmo período de planejamento e considera restrições ambientais.

Por fim, a quarta seção da tese apresenta as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

1.4 MATERIAL E MÉTODOS GERAL

1.4.1 Formação dos blocos de colheita

1.4.1.1 Definição de vizinhança entre talhões

Para cada período do horizonte de planejamento, foi definido um subconjunto composto por todos os talhões da base de dados que se enquadrassem em um intervalo de idades de colheita mínima e máxima (

Figura 1.1a). O objetivo dessa metodologia consiste em garantir que todas as combinações de talhões em blocos sejam aptas para corte. Com isso, essa abordagem tende a evitar que unidades de manejo não suficientemente maduras ou muito maduras componham um bloco que possam resultar em soluções infactíveis no modelo matemático.

Na sequência, com base em cada subconjunto anual formado, foram definidas as redes espaciais de vizinhança entre talhões da floresta. Essas definições foram fundamentadas em duas abordagens gerais denominadas de vizinhança entre talhões adjacentes e vizinhança baseada em uma distância máxima de dispersão entre talhões (

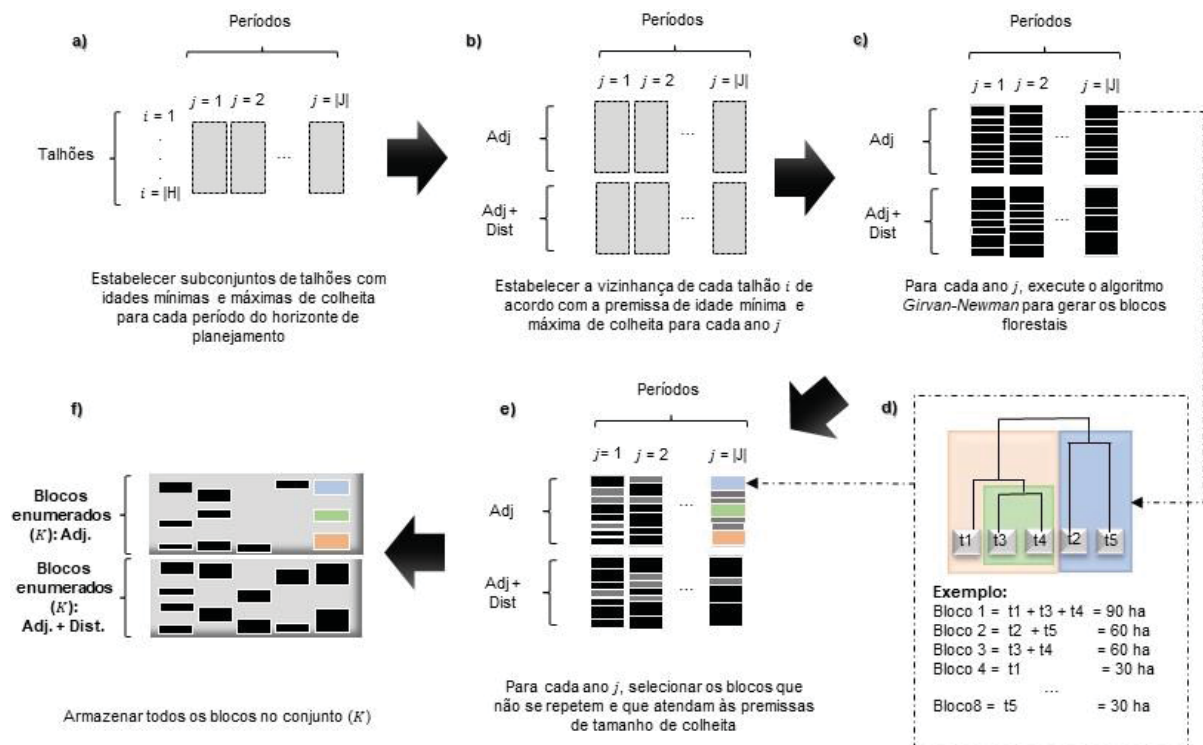
FIGURA 1.1b). Ambas as abordagens foram baseadas em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). No entanto, a vizinhança entre talhões adjacentes foi definida como toda e qualquer unidade que compartilhasse uma borda em comum. Além de que, todos os talhões separados por uma mesma estrada também foram considerados adjacentes, mesmo que nessa condição não houvesse compartilhamento de borda.

Em contrapartida, a vizinhança de talhões baseadas na distância foi definida como a combinação das abordagens de vizinhança entre talhões adjacentes e a vizinhança baseada em uma distância máxima de dispersão entre dois talhões. Assim, foram considerados talhões vizinhos todas as unidades adjacentes, cujo caminho mais curto entre dois talhões fosse menor que um valor máximo de dispersão definido. A determinação do caminho mais curto entre dois talhões foi definida com base no algoritmo de *Dijkstra*, cuja referência baseou-se no centroide de cada polígono que representa um talhão e na estrada mais próxima de cada centroide.

No entanto, considerando que a abordagem de vizinhança baseada na distância entre talhões não considerasse o uso da definição de vizinhança adjacente. Consequentemente, essa metodologia possibilitaria que talhões mutuamente adjacentes não fossem classificados como tais. Isso porque, em alguns casos, a distância entre centroides de polígonos adjacentes pode ser maior que a distância máxima de abrangência estabelecida, possibilitando que talhões adjacentes não sejam classificados como adjacentes. Com isso, os resultados de um modelo de plano

florestal que impede a colheita em áreas adjacentes poderiam ser prejudicados. Portanto, a abordagem de vizinhança baseada na distância foi definida como a combinação das abordagens de vizinhança adjacente e baseada na distância, visando garantir que todos os polígonos mutuamente adjacentes fossem definidos corretamente.

FIGURA 1.1 – PROCEDIMENTO PARA ENUMERAR OS AGRUPAMENTOS FLORESTAIS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DE TAMANHO E IDADE.



Fonte: O autor (2022).

1.4.1.2 Geração e seleção de blocos de colheita

Uma vez estabelecidas as duas abordagens de vizinhança entre talhões, o problema em estudo foi definido conforme o ponto de vista da teoria dos grafos. Dessa maneira, a rede florestal foi denotada por um grafo $G(H, A)$, onde os talhões foram expressos por um conjunto de vértices (H), em que a relação de vizinhança entre os talhões foi descrita conforme um conjunto de arestas (A) que conectam os pares de vértices. Além disso, foram assumidos que o grafo G possui peso, ou seja, cada aresta adjacente carrega um peso não negativo definida pela distância entre os centroides de cada talhão.

Dito isso, e associando ao item 1.4.1.1, o grafo original foi particionado em subgrafos anuais compostos por talhões vizinhos e que satisfizessem a premissa de idade mínima e máxima de corte. Em seguida, cada subgrafo foi configurado como entrada para executar o algoritmo de *Girvan-Newman*, usados para gerar os blocos de corte (

FIGURA 1.1c).

O algoritmo *Girvan-Newman* é um método de agrupamento hierárquico divisivo usado para detectar blocos, ou comunidades, e remover progressivamente arestas do grafo original, levando ao isolamento das comunidades após algumas iterações (GIRVAN; NEWMAN, 2002). O algoritmo funciona identificando e removendo as arestas com base no conceito de medidas de centralidade de intermediação, conhecido como *edge betweenness*, que expressa o comprimento e o número de caminhos mais curtos entre todos os pares de vértices que correm ao longo da aresta (BRANDES, 2001, GIRVAN E NEWMAN, 2002, FORTUNATO, 2010). Uma vez que a rede de caminho mais curto é definida para todas as arestas, a pontuação da aresta mais alta é encontrada e removida do grafo. Após cada remoção, o *edge betweenness* é recalculado para todas as arestas, visando identificar a nova aresta com o valor mais alto (NEWMAN; GIRVAN, 2004). Essas medidas são, crucialmente, recalculadas após cada remoção de aresta, até que cada vértice se represente como um bloco. Esse método pode ser aprofundado conforme a leitura de Brandes (2001), Girvan e Newman (2002) e Newman e Girvan (2004).

Esse algoritmo retorna um dendrograma que representa uma estrutura hierárquica de possíveis divisões da comunidade em qualquer nível (NEWMAN; GIRVAN, 2004). Muitas vezes, são impostas ao algoritmo condições de parada para satisfazer um determinado critério de seleção, como um dado número de blocos ou uma função que mede a qualidade de uma partição (ex. conceito de modularidade) (FORTUNATO, 2010). No entanto, nesse estudo, foram selecionadas todas as combinações de blocos não redundantes geradas nos diferentes níveis e anos que se enquadraram ao requisito de áreas mínima e máxima. Assim, mesmo que a combinação de um bloco pudesse ser um subconjunto de outro bloco, ele corresponde a uma nova combinação e deve ser considerado na enumeração dos blocos (REBAIN; MCDILL, 2003). Em seguida, um conjunto (K) foi formado com todas as combinações de blocos gerados entre/ e em cada ano que atenderam a premissa de áreas mínima e máxima de corte e que fossem não redundantes.

Considerando o exemplo da

Figura 1.1d, assume-se que a área mínima e máxima de um bloco de colheita seja 60 e 300 ha, respectivamente, e que cada talhão possua 30 ha. Dessa forma, pode-se identificar nessa figura que 3 blocos foram capazes de atender ao requisito de área neste ano específico. Esse processo deve ser repetido para todos os períodos do planejamento em que o algoritmo foi executado, estocando-se no conjunto (K) todos os blocos que não se repetem e que atendam as premissas de tamanho de área (

FIGURA 1.1e). Portanto, todos os blocos pertencentes ao conjunto K compõem as diferentes possibilidades de blocos que o modelo de otimização considerará (

FIGURA 1.1f).

O algoritmo de Girvan-Newman foi implementado em linguagem Python utilizando a biblioteca NetworkX para a geração dos blocos de colheita. Com base na respectiva biblioteca, foram utilizadas as funções “girvan_newman” e “edge_betweenness_centrality”.

1.4.2 Definição do conjunto de estradas florestais

A definição das redes de estradas florestais utilizadas como dados de entrada para um modelo matemático deve garantir o atendimento de requisitos técnicos mínimos para seleção de segmentos de estradas, bem como assegurar a acessibilidade à todas as unidades de manejo da floresta (BORGES et al., 2014b). Dessa maneira, a acessibilidade às unidades de manejo deste estudo foi estabelecida conforme a estrada mais próxima ao centroide de cada talhão, as quais foram definidas a partir do uso de dados geoespaciais (*shapefile*) executados no *software* QGIS 3.14.16, conforme mais bem detalhado no Apêndice 1. Na sequência, o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) foi aplicado para gerar os caminhos mais curtos de escoamento da madeira entre cada talhão florestal até o destino (fábrica).

No entanto, tendo em vista a seleção prioritária de determinados tipos de estradas, o algoritmo de *Dijkstra* foi adaptado para penalizar trechos de estrada menos consolidados. As estradas estreitas e de terra, como estradas do tipo secundária, foram submetidas a maiores penalizações que em relação a estradas largas com cascalho ou asfalto, visando minimizar o uso deste tipo de via que não permitem

intenso tráfego de caminhões e maquinários. Deste modo, diferentes pesos foram estabelecidos conforme o tipo de estrada e multiplicados pela distância de cada segmento, de modo que o algoritmo priorizasse a ordem: asfalto, estrada municipal, estrada principal e estrada secundária.

Estabelecidos os caminhos mais curtos de estradas candidatas a serem consideradas no modelo matemático, a rede de estradas foi modelada como um grafo, em que cada segmento de estrada foi representado por um arco direcionado conectado por nós fonte m e nós coletores n . A partir da associação de cada talhão florestal com os nós conectados à rede de estrada, permitiu-se encadear todo o volume anual produzido em cada talhão até o destino (fábrica) (BORGES et al., 2014b).

O algoritmo de Dijkstra foi implementado em linguagem *Python*, utilizando a biblioteca *NetworkX* e a função “*dijkstra_path*” para a definição do caminho mais curto.

1.4.3 Estudo de caso

O procedimento de otimização apresentado neste estudo foi aplicado em dados pertencentes a uma empresa de base florestal, localizada na região Sul do Brasil. Conforme a classificação de Köppen, o clima da região de estudo é do tipo temperado (Cfb), com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C, com geadas. A área total da floresta de estudo foi composta por 3.427,06 ha de *Pinus taeda* L., subdividida em 805 talhões com área média de 4,2 ha. O horizonte de planejamento foi definido em 5 anos, divididos em períodos anuais. A idade dos talhões florestais variou de 9 a 18 anos, com distribuição inicial desigual de classes de idade entre talhões (Figuras 1.2 e 1.3). Porém, conforme premissa adotada pelo proprietário florestal, apenas talhões com idade mínima de 13 anos e máxima de 18 anos podem ser considerados aptos a serem colhidos, justificando a abordagem do item 1.4.1.1.

A floresta é manejada para produzir madeira para processo como principal produto florestal, o qual é destinado para o abastecimento de uma das fábricas da empresa. Além da madeira para processo, essa floresta produz madeira para serraria, que é considerada como volume excedente e comercializado no mercado local. As estimativas de crescimento do povoamento foram definidas e fornecidas pelo proprietário.

As estimativas de receita e custo foram obtidas com o proprietário das terras as quais foram submetidas a uma taxa anual de desconto de 7,5%. A receita da colheita foi estimada a partir do volume de venda de madeira para processo e serraria, e descontados os custos operacionais de colheita. Outro custo considerado neste estudo foi referente ao custo fixo de manutenção da rede de estradas, uma vez que a construção de novas estradas não foi uma opção nesta floresta. Além disso, as estimativas de custos fixos de manutenção de estradas foram apenas aplicadas às estradas não pavimentadas, classificadas como secundárias, principais e municipais.

As estradas secundárias são vias estreitas que não possuem cascalho e possuem um custo de manutenção por Km 480% menor que as estradas principais. As estradas principais correspondem ao maior custo de manutenção por Km, uma vez que são estradas cascalhadas e demandam maior investimento. Por outro lado, as estradas municipais são estradas cascalhadas pertencentes ao município que conforme são utilizadas, o proprietário assume parcialmente os custos de manutenção envolvidos nessa operação, os quais equivalem a um quarto do valor das estradas principais.

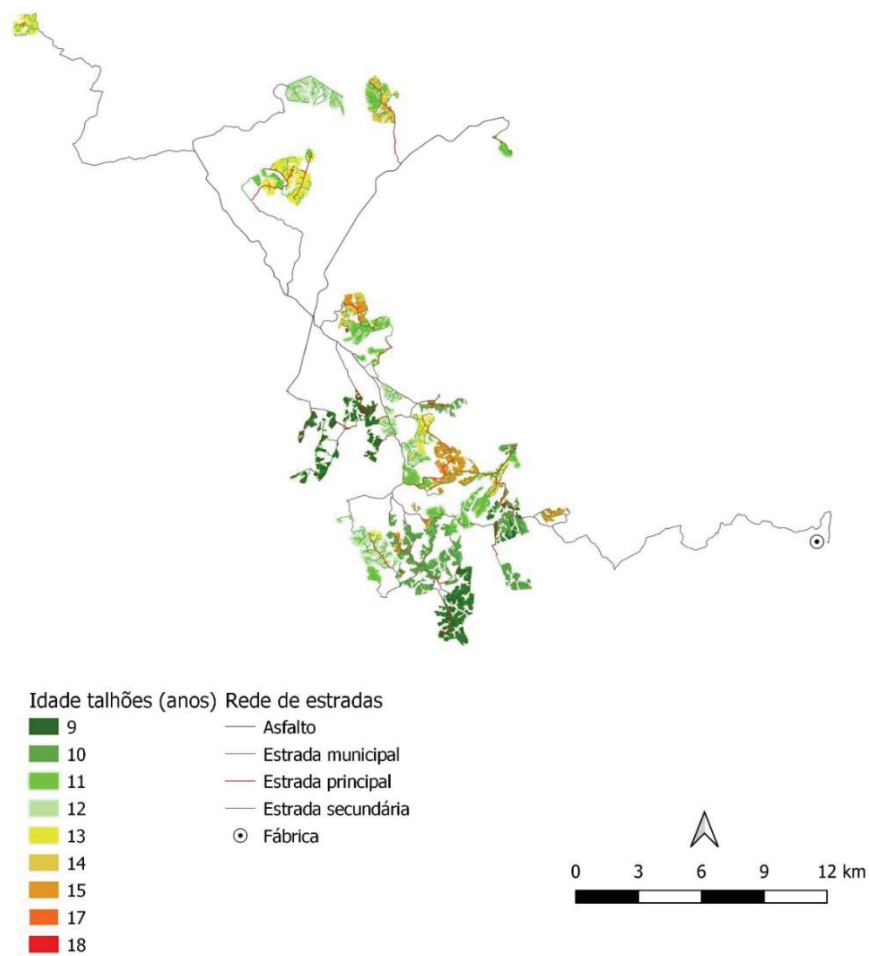
O proprietário florestal estabeleceu a premissa de produção mínima anual de madeira para processo equivalente a 27,8% da sua capacidade produtiva. Outra premissa requerida compete a agregação de áreas de corte. Talhões que compõem um mesmo bloco devem estar a uma distância máxima de dispersão de 2 Km entre eles; além disso, os blocos devem atender a condição de tamanhos mínimo e máximo de corte de 60 e 300 ha, respectivamente. A exigência de área mínima de corte está relacionada a cobertura mínima dos custos com o deslocamento da equipe e maquinário até o local de colheita. Em contrapartida, o uso da área máxima limita a formação de grandes blocos, reduzindo os impactos ambientais.

FIGURA 1.2 - DISTRIBUIÇÃO INICIAL DAS CLASSES DE IDADE DA FLORESTA DE ESTUDO.



Fonte: O autor (2022)

FIGURA 1.3 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL INICIAL DAS CLASSES DE IDADE DA FLORESTA DE ESTUDO.



Fonte: O autor (2022).

REFERÊNCIAS

- ANDALRAFT, N. et al. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation. **Operational Research**, v. 51, n. 4, p. 613–628, 2003.
- AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming. **Journal of Forest Economics**, v. 24, p. 72–81, 2016.
- BANHARA, J. R. et al. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais , espaciais e climáticas. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 85, p. 85–95, 2010.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2–4, p. 145–173, 2005.
- BELLAVENUTTE, P.; CHUNG, W.; DIAZ-BALTEIRO, L. Partitioning and solving large-scale tactical harvest scheduling problems for industrial plantation forests. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, p. 811–818, 2020.
- BORGES, J. G. et al. Integrating management planning levels with decision support systems. In: BORGES, J. G. et al. (Eds.). . **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014a. p. 299–319.
- BORGES, J. G. et al. Strategic management scheduling. In: BORGES, J. G. et al. (Eds.). . **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014b. p. 171–238.
- BRANDES, U. A faster algorithm for betweenness centrality. **Journal of mathematical sociology**, v. 25, n. 2, p. 163–177, 2001.
- BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. San Diego, CA: Elsevier Science, 2003.
- CHUNG, W. et al. **User ' s guide to SNAP for ArcGIS ®: ArcGIS interface for scheduling and network analysis program** U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Portland. Disponível em: <<https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/39933>>.
- D'AMOURS, S.; EPSTEIN, R.; RONNQVIST, M. Operations research in forestry and forest products industry. **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**, 2011.
- 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**, v. 356, p. 124–135, 2015.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische**

Mathematik, v. 271, p. 269–271, 1959.

FORTUNATO, S. Community detection in graphs. **Physics Reports**, v. 486, n. 3–5, p. 75–174, 2010.

GIRVAN, M.; NEWMAN, M. E. J. Community structure in social and biological networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 99, n. 12, p. 7821–7826, 2002.

GUIGNARD, M.; RYU, C.; SPIELBERG, K. Model tightening for integrated timber harvest and transportation planning. **European Journal of Operational Research**, v. 111, n. 3, p. 448–460, 1998.

GUSTAFSSON, L. et al. Retention forestry to maintain multifunctional forests: A world perspective. **BioScience**, v. 62, n. 7, p. 633–645, 2012.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives — discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 18, p. 1–30, 1977.

KIRBY, M. W.; HAGER, W. A.; WONG, P. Simultaneous planning of wildland management and transportation alternatives. **TIMS Studies in the Management Sciences**, v. 21, p. 371–387, 1986.

MCDILL, M. E. **Forest resource management** Pennsylvania State University, , 1999. Disponível em: <https://faculty.washington.edu/toths/ESRM461/Textbook/Ch12_HarvSc.PDF>

MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G. et al. (Eds.). . **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 27–59.

MCDILL, M. E. et al. Comparing Model I and Model II Formulations of Spatially Explicit Harvest Scheduling Models with Maximum Area Restrictions. **Forest Science**, v. 62, n. 1, p. 28–37, 2016.

MOBTAKER, A. et al. Minimizing spatial dispersion of forest harvest areas using spectral clustering and set covering modelling. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 1563–1576, 2018.

NEWMAN, M. E. J.; GIRVAN, M. Finding and evaluating community structure in networks. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 69, n. 2, p. 1–16, 2004.

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

RONNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical Programming**, v. 97, p. 267–284, 2003.

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

ROSS, K. L.; TÓTH, S. F. A model for managing edge effects in harvest scheduling using spatial optimization. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 7, p. 646–654, 2016.

ROSS, K. L.; TÓTH, S. F.; JAROSS, W. S. Forest harvest scheduling with endogenous road costs. **Interfaces**, v. 48, n. 3, p. 1–11, 2018.

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

2 CAPÍTULO 1 - PLANEJAMENTO INTEGRADO DE COLHEITA FLORESTAL E ESTRADAS, CONSIDERANDO REQUISITOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

RESUMO

Os problemas táticos de planejamento florestal que integram decisões de colheita florestal e planejamento de estradas normalmente tratam da alocação espaço-temporal das atividades de manejo em uma paisagem. Tais atividades podem levar a diferentes influências no processo produtivo e nos impactos ambientais de uma floresta, tornando esse planejamento uma etapa importante para a tomada de decisão. Modelar esse tipo de problema é classificado como complexo, pois exige definições de decisão binárias e combinatórias. Apesar dos avanços na solução de problemas que integram o planejamento da colheita com estradas, há poucos documentos que incluem restrições ambientais, como *green-up* e limites de tamanho mínimo e máximo de blocos de colheita. Assim, o objetivo deste estudo foi trabalhar com modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolver problemas de planejamento tático espacial de colheita e estradas florestais, com perspectivas econômicas e ambientais. Nessa abordagem foram testadas diferentes definições de vizinhança entre povoamentos para enumerar os blocos de colheita, integrando requisitos de (1) limite mínimo e máximo de tamanho de bloco e idade de colheita, (2) alocação de blocos de colheita, (3) alocação de estradas de acesso aos povoamentos, e (4) restrições ambientais de corte. Para enumerar os blocos de colheita, os conjuntos de colheita foram gerados *a priori* através da aplicação do algoritmo Girvan-Newman, marcando talvez a primeira aplicação deste algoritmo na literatura florestal. A metodologia aplicada neste estudo permitiu resolver problemas de planejamento tático florestal para colheita e estradas, integrando questões econômicas e ambientais e que resultaram em menos de 3 horas de processamento computacional. Os resultados demonstraram que quanto maior a distância de vizinhança considerada entre dois talhões para enumerar os blocos, maior o retorno econômico (VPL), maior o número de áreas disponíveis para modelos de programação de colheita e, maiores os tamanhos médios de blocos, assim como, menor número de talhões isolados e menor custo de manutenção das estradas.

Palavras-chave: Algoritmo de Girvan-Newman 1. Planejamento florestal tático 2. restrição de adjacência 3. Programação Linear Inteira Mista 4.

2.1 INTRODUÇÃO

Problemas táticos de planejamento florestal que lidam com decisões integradas de colheita florestal e planejamento de estradas normalmente abordam a alocação espaço-temporal das atividades de manejo em uma paisagem. Nesse processo são determinadas prescrições de onde, quando e quanto colher e quais estradas construir ou manter para acessar as unidades de manejo. No entanto, tais decisões de manejo estão inter-relacionadas com o ambiente e podem causar uma variedade de

repercussões ecológicas na paisagem (ROSS; TÓTH, 2016, YOSHIMOTO; ASANTE, 2019). Nesse sentido, o agendamento espacial da colheita associado às decisões de estradas requer um sequenciamento sustentável de ações que produzam benefícios econômicos competitivos, em conjunto com preocupações de atendimento às demandas temporais de madeira e que minimizem os impactos ambientais (RÖNNQVIST et al., 2015).

As restrições mais utilizadas no planejamento florestal para minimizar os impactos ambientais estão associadas à imposição de um limite máximo de tamanho da área de colheita e à prevenção da colheita em áreas adjacentes durante um determinado período (*green-up delay*) (BASKENT; KELES, 2005, GOYCOOLEA et al., 2009, DONG et al., 2018). No entanto, apesar dessas abordagens limitarem que extensas áreas sejam cortadas, não impedem a formação de pequenas aberturas de colheita, possibilitando o aumento da fragmentação da floresta (REBAIN; MCDILL, 2003) e a dificuldade em manter o interior de grandes blocos contíguos não perturbados (GUSTAFSON; CROW, 1994). Por outro lado, esse impacto ambiental pode ser mitigado através do acréscimo de premissas de tamanho mínimo para a formação de bloco de colheita, visando que maiores áreas de floresta sejam formadas e que cresçam juntas (REBAIN; MCDILL, 2003), minimizando os efeitos de borda. Além do mais, outro benefício relacionado a agregação dos talhões se refere a economia de tempo e de custo (SMALTSCHINSKI; SEELING; BECKER, 2012). Isso porque, essa ordenação envolve uma potencial redução na manutenção de estradas e transferência de máquinas florestais para o local de colheita, melhorando a eficiência da colheita e do transporte da madeira (ÖHMAN; ERIKSSON, 2010, AUGUSTYNCZIK et al., 2016, BORGES; KANGAS; BERGSENG, 2017).

Apesar da importância de se determinar o layout espacial e temporal das ações de manejo, essa tarefa se caracteriza como complexa (ROSS; TÓTH, 2016). Problemas que envolvem planejamento integrado de colheita e estradas, e que usam variáveis de decisão binária para representar blocos de colheita e segmentos de estradas, são classificados como *NP-hard* (NADERIALIZADEH; CROWE; ROUHAFZA, 2020). Tipicamente esse tipo de problema têm um conjunto exponencialmente grande de soluções viáveis (WOLSEY, 1998). Dependendo da quantidade de unidades a serem combinadas e de como a vizinhança entre talhões é

definida, pode ocorrer um crescimento numeroso de opções a serem consideradas no problema (BORGES; EID; BERGSENG, 2014).

Usualmente, a relação de vizinhança entre talhões é definida como todas as unidades que compartilham um limite em comum (BORGES; KANGAS; BERGSENG, 2017). Entretanto, na prática, os talhões não precisam ser necessariamente adjacentes para formar um bloco; mas sim que os talhões estejam localizados a uma distância razoável uns dos outros e que sejam acessíveis a partir de uma determinada estrada (BORGES; KANGAS; BERGSENG, 2017, HEINONEN et al., 2018). De acordo com Heinonen et al. (2018), um conceito mais flexível para determinar a vizinhança entre povoamentos tende a incluir povoamentos não adjacentes e isolados em blocos de colheita de silvicultura, aumentando o tamanho dos aglomerados e a rentabilidade da floresta. Por outro lado, essa abordagem tende a aumentar substancialmente a complexidade do problema devido à natureza combinatória de formar unidades florestais em aglomerados, que podem ser extremamente grandes e exigir uma quantidade razoável de processamento (TÓTH et al., 2012, GHARBI et al., 2019).

Apesar da natureza *NP-hard* dos problemas que integram o planejamento da colheita e das estradas, também chamado neste artigo como planejamento integrado, contínuos esforços têm sido dedicados para formular e resolver esses problemas através de abordagens heurísticas, exatas ou combinadas. As técnicas heurísticas possibilitam a resolução de grandes instâncias a um custo computacional razoável (BORGES; HOGANSON; ROSE, 1999). No entanto, métodos heurísticos requerem esforços adicionais para definir parâmetros operacionais mais apropriados (BETTINGER; BOSTON, 2017). Além de que, as heurísticas não garantem a otimalidade nem a proximidade com o ótimo matemático em problemas com grandes instâncias, cujas soluções exatas são incapazes de resolver (NADERIALIZADEH; CROWE; ROUHAFZA, 2020). Por outro lado, obter soluções exatas tem sido uma busca constante pelos planejadores, encorajando novas pesquisas e esforços para solução de problemas de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) (BELLAVENUTTE; CHUNG; DIAZ-BALTEIRO, 2020). Além de que, o desempenho de computadores e algoritmos de otimização tem apresentado contínuo avanço, aumentando as possibilidades de solução de problemas complexos através de métodos exatos (BORGES; KANGAS; BERGSENG, 2017).

Muitos esforços têm sido aplicados na literatura para otimizar problemas de planejamento integrado de colheita e rede de estradas. Como por exemplo, Ross et al. (2018) formularam um modelo de MILP para resolver um problema integrado de colheita e estradas usando a funcionalidade de uma formulação de Modelo II (JOHNSON; SCHEURMAN, 1977), que utiliza variáveis de colheita contínuas, e introduziram restrições gatilho para assumir indicadores de colheita binária sempre que uma quantidade mínima de área fosse programada. Bellavenutte et al. (2020) implementaram uma abordagem híbrida que subdivide um grande problema de planejamento tático integrado em subproblemas menores, os quais foram resolvidos de maneira iterativa por meio da combinação de MILP com um procedimento heurístico. Andalaft et al. (2003) apresentaram a aplicação de um pequeno problema de MILP integrando o planejamento de colheita florestal e a projeção de rede de estradas que considera área mínima de colheita. Nesse modelo, os autores aplicaram estratégias de solução envolvendo o fortalecimento do modelo, içamento de algumas restrições e a aplicação do relaxamento Lagrangeano para decompor o problema em componentes mais simples. Ademais, Chung et al. (2012) apresentaram uma ferramenta analítica baseada em heurísticas que auxilia o planejamento espacial da colheita e estradas e, possibilita atender restrições de volume, de adjacência e de diferentes sortimentos de madeira.

Apesar dos expressivos avanços obtidos na solução de problemas de planejamento integrado, poucos têm sido tratados com planejamento integrado combinados com restrições de tamanho de blocos mínimos e máximos de corte e, restrições de adjacência. Assim, nossa colaboração neste estudo visa testar uma abordagem de PLIM que resolva um problema de planejamento tático espacial de colheita e estradas com perspectivas econômicas e ambientais. Nessa abordagem, visamos testar diferentes definições de vizinhança entre talhões para formação de blocos de colheita e integrar requisitos de: (1) idades e tamanhos mínimo e máximo para a formação de blocos, (2) alocação de blocos de colheita, (3) alocação de estradas de acesso a esses blocos, e (4) restrições *green-up*.

Para a formação dos blocos de colheita realizamos um pré-processamento para enumerar os conjuntos de corte utilizando o algoritmo de Girvan-Newman. Esse algoritmo é um método de agrupamento hierárquico divisivo usado para detectar blocos e remover progressivamente arestas do grafo original, levando ao isolamento

das comunidades após algumas iterações (GIRVAN; NEWMAN, 2002). Além disso, este algoritmo é historicamente importante uma vez que marcou o início de uma nova era no campo de detecção de comunidade em grafos (FORTUNATO, 2010) e hoje tem aplicações multidisciplinares, como por exemplo nas áreas: física (GIRVAN; NEWMAN, 2002, NEWMAN; GIRVAN, 2004, NEWMAN, 2004a, NEWMAN, 2004b, NEWMAN, 2006, FORTUNATO, 2010), redes sociais (GIRVAN; NEWMAN, 2002, MYLAVARAPU; GOVINDARAJAN, 2020), redes biológicas (DEHMER; BASAK, 2012, JIAO et al., 2020), entre outros.

Conforme o nosso entendimento, essa é a primeira aplicação do algoritmo de Girvan-Newman na literatura florestal. A inspiração inicial para o uso desse algoritmo se deu a partir do relato de Costa (2020). Nessa publicação, o autor definiu a vizinhança entre talhões com base em uma distância máxima de dispersão entre talhões e aplicou o algoritmo de Girvan-Newman para formação dos blocos de colheita para um ano de planejamento. Em seguida, utilizando o conceito de modularidade, foi selecionada a melhor subdivisão de blocos retornados pelo algoritmo e eliminadas todas as formações que não atenderam uma área mínima de corte. No presente estudo, implementamos o mesmo algoritmo para a formação dos blocos de colheita; porém, nosso problema foi conduzido em um planejamento de 5 anos e considerados blocos que atendessem áreas de tamanho mínimo e máximo. Além de que, ao invés de utilizarmos o conceito de modularidade para a seleção das melhores formações de blocos permitimos ao MILP atribuir as melhores formações de blocos formados *a priori*.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram abordadas três etapas para modelar e resolver o problema definido. A primeira etapa baseou-se em estabelecer para cada período do horizonte de planejamento diferentes conjuntos de vizinhança entre talhões com idade de colheita, conforme descrito no subitem 1.4.1.1. Essas definições foram usadas como dados de entrada para a segunda etapa, a qual gera uma grande quantidade de blocos de colheita por meio do algoritmo de *Girvan-Newman*. Em seguida, os blocos são enumerados de acordo com requisitos de tamanho e idade, e integrados aos modelos de otimização na terceira etapa para resolver o problema de planejamento de colheita e estradas.

2.2.1 Formulação matemática

A programação Linear Inteira Mista (PLIM) foi aplicada para otimizar o layout espacial e temporal das ações de gerenciamento de um planejamento de colheita e transporte florestal. Para isso, a rede de estradas foi modelada como um grafo $F(N, Y)$, onde os segmentos de estradas foram expressos por nós (N), e o conjunto de arcos direcionados (Y) foram representados pela conexão entre os nós fonte m e o nó de saída n . A partir da associação de cada talhão florestal com os nós conectados à rede de estrada, todo o volume produzido na floresta pode ser transportado até o nó final (fábrica) em cada ano j (BORGES et al., 2014). Na sequência, são apresentados todos os índices, conjuntos de dados, parâmetros e variáveis usadas para formular o modelo. Por último, a formulação do modelo foi descrita.

Índices

- i, i' : Talhões florestais: $1, \dots, |H|$
- j : Períodos do horizonte de planejamento: $1, \dots, |J|$
- p : Sortimentos de madeira: $1, \dots, |P|$
- k, k' : Blocos florestais: $1, \dots, |K|$
- m, n : Segmentos de estradas potenciais que descrevem um arco entre os nós m e $n \in N$

Conjuntos

- H : Conjunto de talhões da floresta
- J : Conjunto de períodos do horizonte de planejamento
- P : Conjunto de sortimentos de madeira
- C_k : Conjunto de blocos florestais k
- O : Conjunto de talhões que não pertencem a nenhum bloco florestal
- K : Conjunto de blocos que atendem a premissa de área mínima e máxima de abertura
- A_i : Conjunto de todos os talhões de corte adjacentes ao talhão i
- B_i : Conjunto de blocos de colheita que contém o talhão i
- $\bar{B}_i$: Conjunto de blocos de colheita adjacentes ao talhão i and $\bar{B}_i \neq B_i$
- N : Conjunto de nós da rede de estradas florestais
- Y : Conjunto de possíveis arcos (m, n)
- $N_{\bar{c}}$: Conjunto de arcos conectados ao nó final (fábrica) $\bar{c}$
- H_n : Conjunto de talhões que contém o nó n

Parâmetros

- μ_k : Área total (ha) do bloco k
- l_{ij} : Valor presente líquido relacionado às receitas e custos da colheita florestal caso o talhão i seja cortado no período j (R\$/ano)
- v_{ijp} : Volume do sortimento de madeira p produzido no talhão i no período j (m³/ano)
- ω_{ij} : Volume total de madeira produzido no talhão i no período j (m³/ano)
- τ_p : Demanda mínima anual do sortimento p (m³/ano)

- σ : Capacidade de produção máxima (m³/ ano)
 n_i : Idade do talhão i no primeiro período do horizonte de planejamento (anos)
 η : Idade mínima de corte (anos)
 β : Idade máxima de corte (anos)
 g : Período de *green-up* entre talhões cortados adjacentes (anos)
 c_{mnj} : Custo presente de manutenção de estradas (R\$) caso o segmento de estrada entre os nós m e n seja selecionado no período j (R\$/ano)
 s_{mn} : Fluxo máximo no arco (m, n) caso seja habilitado
 U : Área total máxima de colheita permitida para seleção no planejamento (ha)

Variáveis de decisão

- x_{ij} : Variável binária que assume o valor 1 caso o talhão i seja selecionado para corte no período j , e 0 caso contrário
 b_{kj} : Variável binária que assume valor 1 caso o bloco k seja selecionado para corte no período j , e 0 caso contrário
 z_{mnj} : Variável binária que assume valor 1 caso o segmento de estrada entre os nós m e n seja selecionado no período j , e 0 caso contrário
 f_{mnj} : Fluxo anual de madeira (m³/ ano) transportado ao longo do segmento de estrada entre os nós m e n no período j

Maximizar:

$$\sum_{i=1}^{|H|} \sum_{j=1}^{|J|} l_{ij} \cdot x_{ij} - \sum_{(m,n) \in Y} \sum_{j=1}^{|J|} c_{mnj} \cdot z_{mnj} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in H \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{|H|} (v_{ijp} \cdot x_{ij}) \geq \tau_p \quad \forall j \in J, p = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{|H|} (\omega_{ij} \cdot x_{ij}) \leq \sigma \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$(n_i + j - 1) \cdot x_{ij} \geq \eta \cdot x_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5)$$

$$(n_i + j - 1) \cdot x_{ij} \leq \beta \cdot x_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{i \in C_k} x_{ij} \geq |C_k| \cdot b_{kj} \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{k \in B_i} b_{kj} = x_{ij} \quad \forall i \in H, \forall j \in J \quad (8)$$

$$f_{mnj} = \sum_{i=1}^{|H|} \omega_{ij} \cdot x_{ij} \quad \forall (m, n) \in N_c, \forall i \in H, \forall j \in J \quad (9)$$

$$\sum_{i \in H_n} (\omega_{ij} \cdot x_{ij}) + \sum_{(m,n) \in Y} f_{mnj} - \sum_{(n,o) \in Y} f_{noj} = 0 \quad \forall n \in N \setminus \{\bar{c}\}, \forall j \in J \quad (10)$$

$$f_{mnj} + f_{nmj} \leq s_{mn} \cdot z_{mnj} \quad \forall (m,n) \in Y, \forall j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{k \in B_i} b_{kj} + \sum_{\substack{k' \in \bar{B}_i \\ k' \notin B_i}} b_{k'(j+g)} \leq 1 \quad \forall i \in H, \forall i \notin O, \forall j \in J, \quad g = 0, \forall (j+g) \leq |J| \quad (12)$$

$$\sum_{b=1}^{|K|} \sum_{j=1}^{|J|} b_{kj} \cdot \mu_k \leq U \quad (13)$$

$$x_{ij}, b_{kj}, z_{mnj} \in \{0,1\} \text{ e } f_{mnj} \geq 0 \quad (14)$$

A função objetivo (1) é composta por dois termos que maximizam o lucro líquido presente da floresta ao longo do horizonte de planejamento. O primeiro termo representa a diferença entre as receitas líquidas descontadas aos custos da colheita florestal, enquanto o segundo termo contabiliza os custos correntes de manutenção de estradas. Isto é, essa premissa não considera as eventuais manutenções realizadas em períodos anteriores.

A restrição (2) garante que o talhão i possa ser colhido no máximo uma vez ao longo do horizonte de planejamento. A equação (3) garante que a meta de produção mínima de madeira para processo no período j seja atingida. A equação (4) impõe que a capacidade de produção em cada período j seja respeitada. As inequações (5) e (6) garantem que apenas talhões com idades entre η e β possam ser agendados para serem colhidos. O conjunto de restrições (7) e (8), são adaptações baseadas em Rebain e McDill (2003) e Augustynczyk et al. (2017) que garantem que blocos de colheita sejam selecionados ao longo do horizonte de planejamento. A restrição (7) garante que caso um bloco k seja selecionado para corte no período j , todos os talhões i contidos no respectivo bloco k sejam selecionados. A restrição (8) garante que cada talhão designado para corte pertença a apenas um bloco de colheita. A imposição de que apenas um bloco de colheita seja selecionado para cada talhão, é uma das mudanças feitas em relação à proposta dos autores citados acima. Este conjunto de restrições garantem que os blocos de colheita não se sobreponham.

Esta mudança se mostra importante quando a utilizamos em conjunto com a restrição (12), pois elas proíbem a colheita simultânea de blocos adjacentes.

O conjunto de restrições (9) à (11) estão relacionados às estradas. A equação (9) garante que o nó conectado ao destino final da rede de estrada (fábrica) receba o volume total produzido pelos talhões selecionados em cada período. O conjunto de restrições (10) representam as equações de equilíbrio de fluxo de volume para todos os nós que não estão conectados ao destino final (BORGES et al., 2014, BELLAVENTTE; CHUNG; DIAZ-BALTEIRO, 2020). Isto é, esta equação garante que volume total de entrada proveniente de cada talhão florestal associado aos nós conectados à rede de estradas (f_{mnj} , f_{noj}) sejam igualados ao volume total que deixa o nó, em um dado período j (BORGES et al., 2014). Isso garante que todo volume de madeira produzido nas unidades de manejo agendadas para corte seja encaminhado pela rede de estradas até chegarem ao destino final na rede. O conjunto de restrições (11) garantem acionar o segmento de estrada m e n se houver fluxo de madeira diferente de zero, o qual permanece aberto e disponível durante o período j (BORGES et al., 2014) BELLAVENTTE; CHUNG; DIAZ-BALTEIRO, 2020). O *Big-M* representa um arbitrário grande número.

Tendo em vista considerar o padrão da paisagem nas funções ecológicas, a restrição (12) limita que blocos contíguos sejam colhidos simultaneamente durante um período definido de *green-up delay*. A restrição (13) garante que a soma total das áreas designadas para colheita em todos os períodos não exceda o valor do parâmetro U . Essa restrição possibilita a comparação entre cenários que utilizam um mesmo modelo matemático, porém que diferem na configuração da vizinhança entre talhões. Ou seja, a partir da execução prévia dos cenários pertencentes a um mesmo modelo matemático e que não utilizam a restrição (13), é somada a área total agendada do cenário mais restritivo (vizinhança adjacente) do modelo para compor o valor do parâmetro U . Por fim, o conjunto de restrições (14) impõe a integralidade e não negatividade às variáveis de decisão envolvidas nos modelos.

2.2.2 Estudo de caso

O estudo de caso foi fundamentado em dados reais pertencentes a uma empresa de base florestal localizada na região Sul do Brasil, conforme descrito

previamente no subitem 1.4.3 da tese. Como essa floresta compreende pequenas unidades florestais, cuja área média é de 4,7 ha, diferentes definições de vizinhança foram testadas entre talhões para minimizar o número de talhões isolados que não atendessem ao critério de tamanho mínimo dos blocos de colheita requerido pelo proprietário.

Assim, três diferentes abordagens foram testadas para definir a vizinhança entre talhões como entrada para o Algoritmo de *Girvan-Newman* e, consequente, formar os blocos de colheita. A primeira abordagem corresponde a vizinhança entre talhões adjacentes, tradicionalmente utilizada em problemas de planejamento espacial. A segunda e a terceira abordagem basearam-se na combinação das definições de vizinhança entre talhões adjacentes e baseados na distância, cuja distância de dispersão máxima entre dois talhões foi definida em 1 e 2 Km.

No total, quatro modelos matemáticos foram testados (TABELA 2.1). O primeiro modelo, definido como modelo original (OM_1.0), trabalhou com restrições base, utilizadas em todos os modelos. No modelo OM_2.0 foi incluída a restrição ambiental (12). Nos modelos CM_1.1 e CM_2.1 foi incluída a restrição (13) na formulação matemática, cujo objetivo consiste em limitar a área de corte dos modelos para possibilitar a avaliação da performance dos cenários quanto as diferentes abordagens de vizinhança entre talhões. A inclusão destes modelos comparativos fora necessária uma vez que a igualdade da inequação (2) levava a infactibilidade dos modelos. Desta forma, com base na soma da área total de corte designadas nos cenários que utilizaram a abordagem mais restritiva de vizinhança adjacente entre talhões dos modelos OM_1.0 e OM_2.0, foram definidos o parâmetro U para o modelo CM_1.1 e CM_2.1, respectivamente.

Os modelos foram escritos em linguagem Python e resolvidos via Gurobi 9.0.3, em um computador Intel® Core™ i7-8550U 2.00 GHz de processador e 8GB de RAM. Foram estabelecidos um tempo máximo de processamento de 3 horas para todos os cenários trabalhados. Além disso, foram utilizados o programa QGIS 3.14.16 para gerar determinados parâmetros e visualizar os resultados dos cenários otimizados.

TABELA 2.1 - CENÁRIOS TESTADOS.

Vizinhança entre talhões						
Modelo	Nome	Adjacente	Dist. * 1Km	Dist.* 2Km	Cenários	Restrições
OM_1.0	Modelo original	X			OM_1.0_A	2 – 11
		X	X		OM_1.0_1Km	2 – 11
		X		X	OM_1.0_2Km	2 – 11
OM_2.0	Modelo ambiental	X			OM_2.0_A	2 – 12
		X	X		OM_2.0_1Km	2 – 12
		X		X	OM_2.0_2Km	2 – 12
CM_1.1	Comparativo modelo original	X	X		CM_1.1_1Km	2 – 11 e 13
		X		X	CM_1.1_2Km	2 – 11 e 13
CM_2.1	Comparativo modelo ambiental	X	X		CM_2.1_1Km	2 – 13
		X		X	CM_2.1_2Km	2 – 13

* Vizinhança baseada na distância

FONTE: O autor (2022).

2.3 RESULTADOS

A TABELA 2.2 apresenta o número total de blocos de colheita gerados a partir da aplicação de diferentes definições de vizinhança entre talhões e critérios de enumeração de blocos. Foi observada a tendência de que quanto maior a abrangência de vizinhança entre talhões, maior o número de combinações de blocos. Da mesma forma, essa tendência pode ser observada em relação ao tempo de processamento do algoritmo de Girvan-Newman. Enquanto a abordagem de vizinhança adjacente demandou 203,4 segundos, as abordagens de vizinhança com base na distância de 1 e 2 Km resultaram em 1.164,39 e 10.052,42 segundos de processamento, respectivamente. Já, as etapas de seleção e enumeração dos blocos viáveis para corte demandaram milésimos de segundos de processamento, não havendo diferenciação relevante de tempo entre elas.

Por outro lado, a partir da aplicação das duas últimas etapas apresentadas na TABELA 2.2, houve uma redução considerável no número de blocos viáveis que atenderam aos requisitos de tamanho de área e agrupamentos sem repetição. Essa redução está relacionada aos conjuntos de talhões pequenos e isolados que não foram capazes de atender, em especial, a premissa de área mínima de bloco. Como consequência, muitos desses talhões não fizeram parte de nenhuma formação de bloco inibindo-os de serem agendados no modelo matemático. Isso porque, a

restrição (8) garante que cada talhão seja igual à soma dos blocos nos quais este talhão está contido. Assim, os talhões que não estiverem contidos em nenhum bloco resultarão em valor 0 e não serão agendados para colheita. Dessa maneira, a abordagem de formação de blocos que considerou apenas a vizinhança adjacente apresentou 71% da área total apta a ser otimizada pelo modelo matemático, enquanto os cenários de abrangência máxima de 1 e 2 Km resultaram em 89% e 94% de área apta a ser designada no agendamento, respectivamente.

TABELA 2.2 - NÚMERO TOTAL DE BLOCOS DE COLHEITA CONFORME AS DIFERENTES DEFINIÇÕES DE VIZINHANÇA ENTRE TALHÕES.

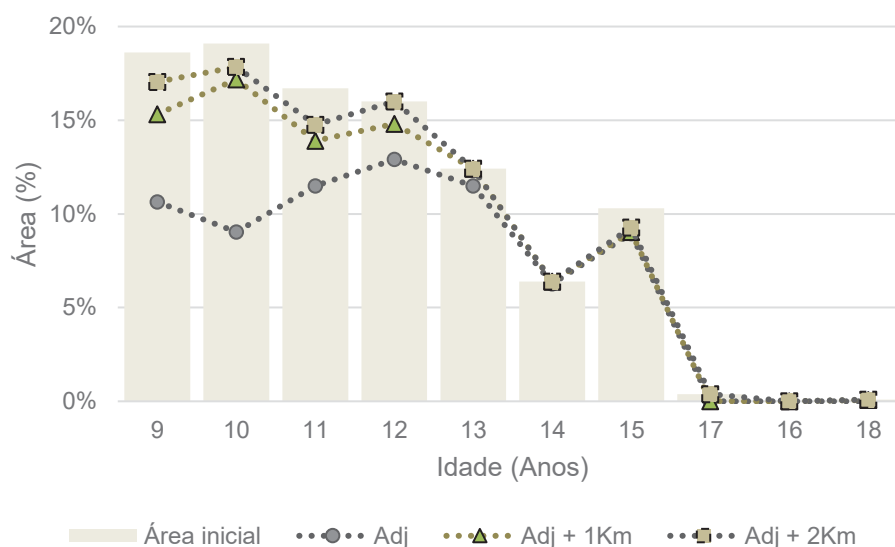
Descrição	Adjacência entre talhões		
	Adjacente	Dist. 1 Km ¹	Dist. 2 Km ¹
Número de blocos gerados pelo algoritmo de Girvan-Newman	616.631	693.853	703.855
Número de blocos com tamanho mínimo e máximo	3.510	4.073	17.938
Número de blocos duplicados	3.431	3.960	17.392
Total de blocos de colheita elegíveis	79	113	546

¹Distância máxima de dispersão entre dois talhões para serem classificados como vizinhos.

FONTE: O autor (2022).

Além da área elegível para colheita se diferenciar conforme as abordagens de vizinhança entre talhões para formação dos blocos, a distribuição das faixas de idade da floreta também foi influenciada pelo mesmo motivo (FIGURA 2.1). As metodologias que aplicaram a abordagem de vizinhança baseada na distância entre talhões resultaram em valores parecidos quanto a área total elegível para ser selecionada e a distribuição da faixa etária do povoamento. Todavia, o método que adotou a distância máxima de 2 Km resultou em maior percentual de área disponível para seleção e de talhões menores que 13 anos. Por outro lado, a abordagem de vizinhança adjacente resultou em maior percentual de áreas mais próximas da idade de corte e menor área total apta a ser agendada.

FIGURA 2.1 - PERCENTUAL DE ÁREA POR IDADE (ANOS) DISPONÍVEL PARA SER AGENDADA PELOS MODELOS MATEMÁTICOS CONFORME AS DIFERENTES ABORDAGENS DE FORMAÇÃO DE BLOCOS DE COLHEITA.



FONTE: O autor (2022).

Na TABELA 2.3 são apresentados os percentuais de áreas agendadas e não agendadas geradas a partir da execução dos cenários matemáticos. O percentual de áreas agendadas foi composto pela relação entre a soma das áreas agendadas ao longo das idades de corte e a área total do estudo. Por outro lado, o total de área ociosa é composto pela relação da soma entre as áreas não agendadas pelo modelo matemático, permitidas pela restrição (2), e a soma das áreas que não foram capazes de formar blocos de colheita, ambas divididas pela área total do estudo.

TABELA 2.3 - DISPOSIÇÃO RELATIVA DAS ÁREAS DE COLHEITA POR CENÁRIO.

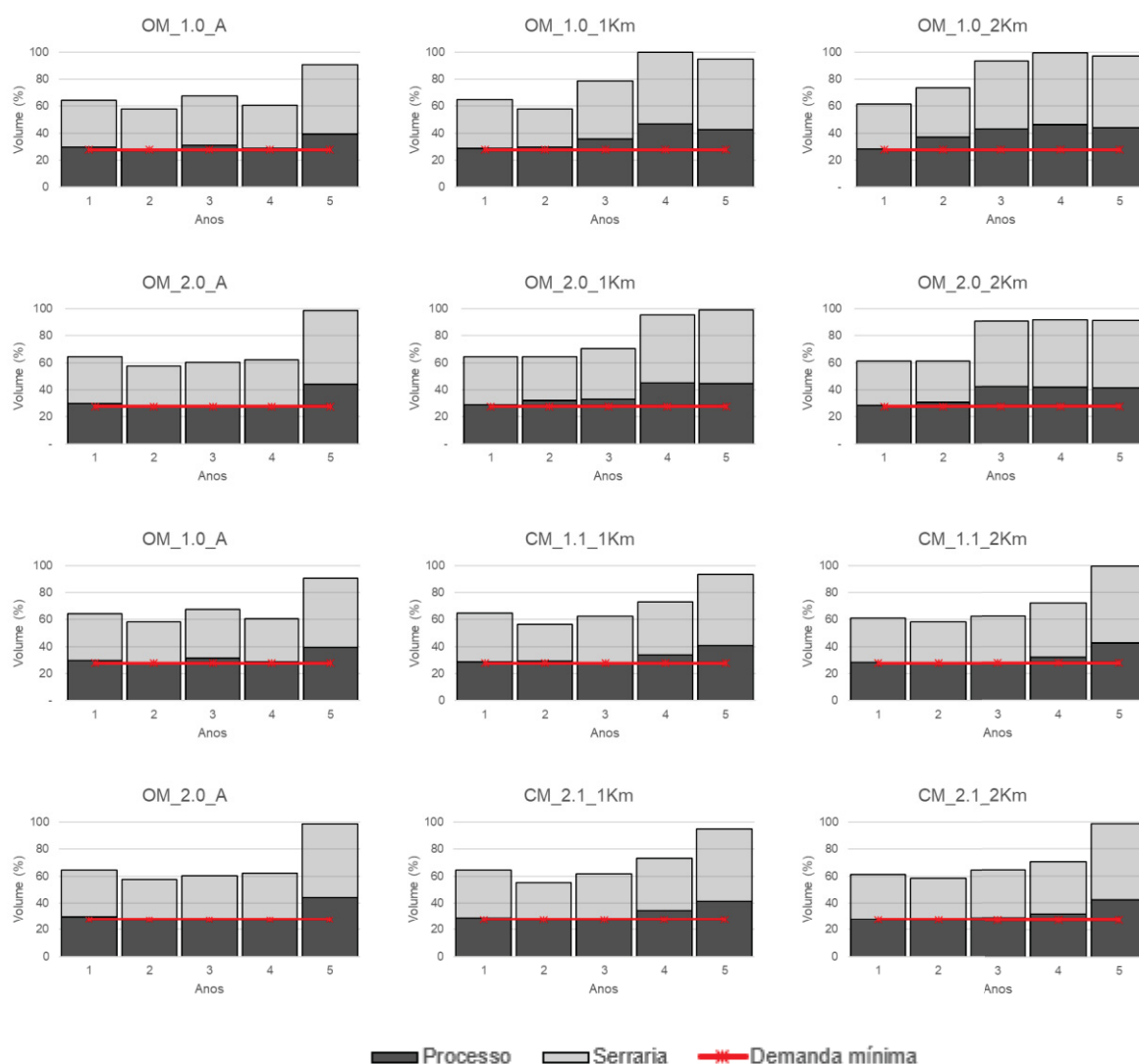
Cenários	Área de corte conforme a idade (%)						Total área agendada	Área não agendada	Área sem bloco	Total área ociosa
	13	14	15	16	17	18				
OM_1.0_A	38	13	11	2	2	4	71 %	0 %	29 %	29 %
OM_1.0_1Km	44	18	15	0	4	1	82 %	7 %	11 %	18 %
OM_1.0_2Km	53	18	6	6	3	1	89 %	5 %	6 %	11 %
OM_2.0_A	35	12	14	7	2	2	71 %	0 %	29 %	29 %
OM_2.0_1Km	42	16	18	4	1	1	82 %	7 %	11 %	18 %
OM_2.0_2Km	43	20	9	6	3	1	82 %	12 %	6 %	18 %
CM_1.1_1Km	27	20	16	6	1	1	71 %	18 %	11 %	29 %
CM_1.1_2Km	24	19	21	3	0	4	71 %	23 %	6 %	29 %
CM_2.1_1Km	24	25	17	0	5	1	71 %	18 %	11 %	29 %
CM_2.1_2Km	25	17	21	4	0	4	71 %	23 %	6 %	29 %

FONTE: O autor (2022).

Os resultados da TABELA 2.3 indicam que no modelo original (OM_1.0) a área de corte agendada para o cenário OM_1.0_2Km foi 25% maior que o cenário OM_1.0_A e 9% maior que em relação ao cenário OM_1.0_1Km. Ou seja, quanto maior a abrangência dos blocos de colheita maior o percentual de áreas elegíveis para serem agendadas pelo planejamento florestal. Além disso, essa tendência implicou na alocação de áreas mais jovens nos cenários mais abrangentes, os quais foram influenciados pela maior abrangência dos blocos e pela maior quantidade de área abaixo de 13 anos. Observa-se também que os cenários OM_1.0_1Km e OM_1.0_2Km apresentaram um percentual de área não agendada, enquanto o cenário OM_1.0_A selecionou todos os 71% de área disponível. Todavia, o resultado obtido no cenário OM_1.0_A não está associado a um melhor desempenho da abordagem adotada, mas sim à distribuição das classes de idade das áreas elegíveis a serem agendadas neste cenário.

Com base na análise da TABELA 2.3 e da FIGURA 2.2, percebe-se que o cenário OM_1.0_A teve vantagem sobre os demais cenários, pois otimizou menos áreas de efetiva floresta e garantiu maior percentual de floresta madura, permitindo que este cenário programasse todas as suas áreas elegíveis. Em contrapartida, os cenários OM_1.0_2Km e OM_1.0_1Km trabalharam com maior percentual de área abaixo da idade mínima de corte, permitindo que os maiores volumes produzidos pudessem ser agendados apenas nos últimos anos. Ou seja, os cenários não designaram determinadas áreas de corte uma vez que nos primeiros anos do planejamento parte da área não estava disponível para ser agendada devido a idade e, nos últimos períodos a capacidade máxima havia sido atingida, resultando em áreas não agendadas.

FIGURA 2.2 - PERCENTUAL DE VOLUME DE CORTE POR SORTIMENTO ANO.



FONTE: O autor (2022).

No modelo ambiental, apesar da restrição de *green-up* (12) tornar o problema mais limitado, os cenários OM_2.0_A e OM_2.0_1Km foram capazes de manter o percentual de agendamento das áreas elegíveis. No entanto, o cenário OM_2.0_2Km reduziu o percentual de área agendada e se igualou ao valor do cenário OM_2.0_1Km (TABELA 2.3). O principal aspecto da solução obtida está relacionado a formação da floresta disponível para ser agendada no cenário OM_2.0_2Km e às restrições impostas ao problema. Em outras palavras, o cenário OM_2.0_2Km trabalhou com maior área total elegível do que os outros cenários desde modelo e foi composto por florestas mais jovens. Quando adicionada a restrição ambiental, o problema ficou menos flexível para atender às restrições do modelo matemático e manter o percentual de área não agendada como no modelo.

Em contrapartida, os modelos CM_1.1 e CM_2.1, que foram implementados para fins comparativos, os quais utilizaram como parâmetro de área máxima de agendamento (U) o valor equivalente à 2,424.01 ha. Essa área está relacionada a área total agendada nos cenários OM_1.0_A e OM_2.0_A, que representam os cenários mais restritivos nos modelos OM_1.0 e OM_2.0. A partir do uso desse limiar entre os cenários, os modelos comparativos puderam ser executados e comparados entre diferentes abordagens de vizinhança entre talhões.

Considerando o modelo original comparativo (CM_1.1), o qual é composto pelos cenários OM_1.0_A, CM_1.1_1Km e CM_1.1_2Km, pode-se observar que quanto maior a distância de abrangência permitida para a definição de vizinhança entre talhões maior o percentual de floresta madura agendada para colheita. Da mesma forma, o modelo comparativo ambiental, composto pelos cenários OM_2.0_A, CM_2.1_1Km e CM_2.1_2Km, seguiram a mesma tendência de agendar talhões mais velhos conforme o aumento da abrangência entre a vizinhança entre talhões. No entanto, o agendamento de áreas mais maduras de acordo com a maior abrangência de vizinhança entre os cenários resultou em uma tendência contrária às obtidas nos dois primeiros modelos. Mesmo com a limitação de área máxima de corte (13), os cenários com maior abrangência de vizinhança continuam dispondo de mais áreas elegíveis para serem agendadas, permitindo ao modelo matemático selecionar blocos mais produtivos e rentáveis.

Com o aumento da abrangência da vizinhança entre os talhões também houve acréscimo no lucro presente atual do planejamento (Tabela 2.4). Porém, conforme novas restrições foram adicionadas aos modelos matemáticos, diminuíram os retornos econômicos. Por questões de confidencialidade, os resultados dessa tabela foram expressos em termos relativos considerando por base o valor total do cenário OM_1.0_A, cujo valor foi arbitrado em 100, e nos demais foi mantida a proporcionalidade dos valores reais.

A partir do comparativo entre os cenários do modelo original, pode-se observar que o cenário OM_1.0_2Km foi 23% e 7% mais lucrativo que em relação aos cenários OM_1.0_A e OM_1.0_1Km, respectivamente. Além disso, os resultados do modelo ambiental comparados entre os cenários OM_2.0_1Km e OM_2.0_2Km foram semelhantes; em contrapartida, ambos obtiveram um retorno de aproximadamente 15% a mais que em relação ao cenário OM_2.0_A.

Apesar da diferença de tempo de processamento entre os cenários, todas as soluções foram obtidas em menos de 1 minuto de execução. Além de que, os cenários resultaram em GAP de 0%. Ou seja, o GAP representa a qualidade das soluções inteiras que são representadas pela tolerância relativa entre o melhor objetivo inteiro e o objetivo do melhor nó restante, o quais foram gerados pelo otimizador Gurobi.

TABELA 2.4 - SOLUÇÕES OBTIDAS A PARTIR DA EXECUÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE OTIMIZAÇÃO PARA TODOS OS CENÁRIOS.

Cenários	VPL colheita*	Custo estradas*	Total*	Time (s)	GAP	Dist. total. (Km) **
OM_1.0_A	103,5	-3,5	100,0	1,1	0,00%	457,53
OM_1.0_1Km	118,7	-3,8	114,9	1,2	0,01%	507,87
OM_1.0_2Km	127,0	-3,8	123,1	11,1	0,00%	519,63
OM_2.0_A	103,6	-3,6	100,0	0,8	0,00%	489,58
OM_2.0_1Km	118,3	-3,7	114,5	0,7	0,00%	494,02
OM_2.0_2Km	119,1	-3,7	115,4	5	0,00%	515,59
CM_1.1_1Km	106,1	-3,4	102,7	7,6	0,00%	446,08
CM_1.1_2Km	108,1	-3,4	104,7	22,5	0,00%	470,37
CM_2.1_1Km	106,1	-3,4	102,7	5,8	0,00%	445,9
CM_2.1_2Km	108,0	-3,5	104,6	11,8	0,00%	475,21

* Por questões de confidencialidade, os resultados se expressam em termos relativos considerando por base o valor total do cenário OM_1.0_A cujo valor foi arbitrado em 100, e nos demais, foi mantida a proporcionalidade dos valores reais.

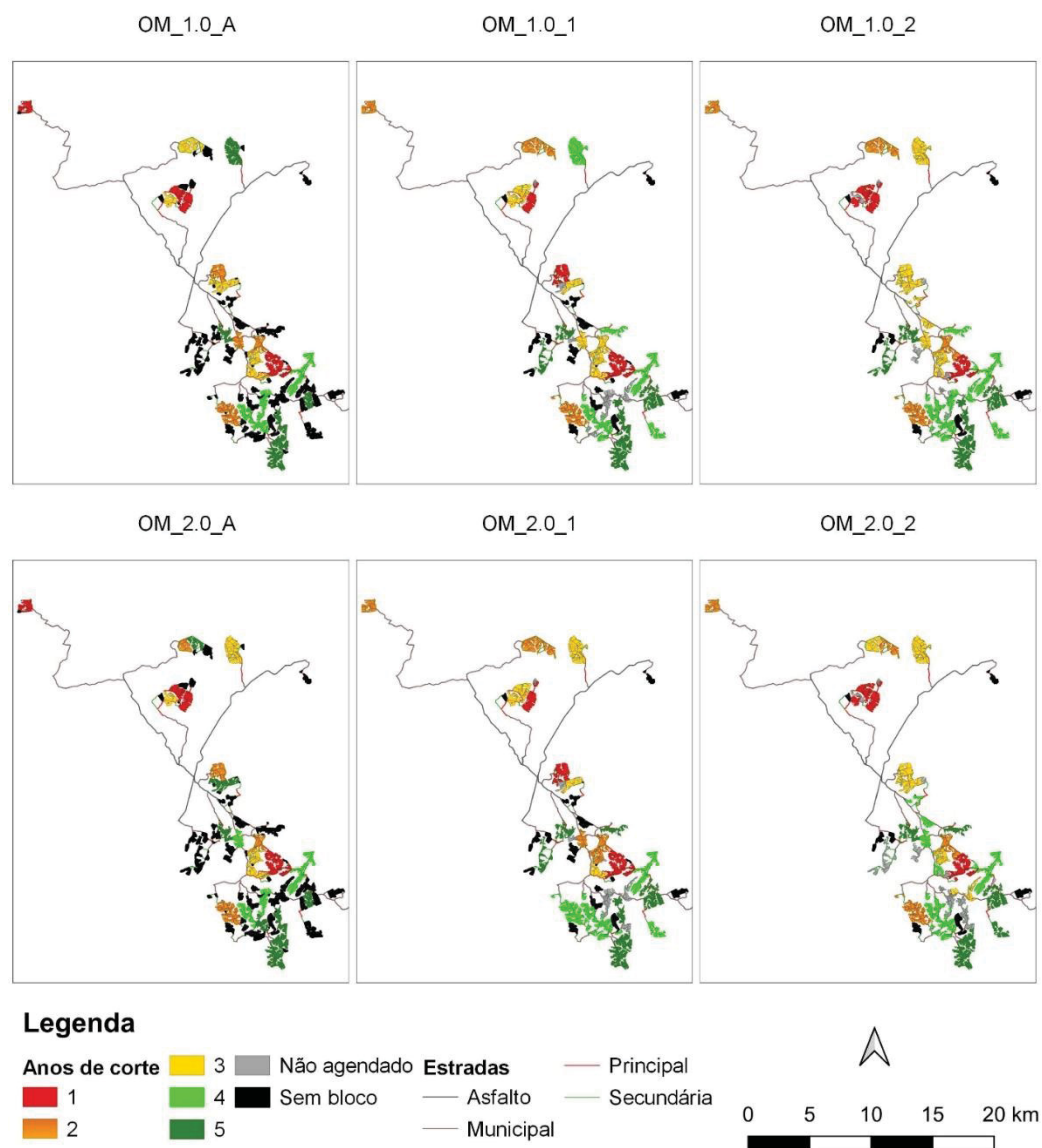
** Distância total de estradas atribuídas no planejamento tático.

FONTE: O autor (2022).

Na Tabela 2.4, também são apresentados os custos presentes de estradas em termos relativos, a distância total (Km) e a extensão média dos segmentos de estradas agendados em cada cenário. Os resultados mostraram que os cenários cuja abrangência da vizinhança entre talhões foi mais ampla entre talhões, resultaram em custos de estradas mais elevados; no entanto, estes mesmos cenários geraram maior receita presente em função da maior área total selecionada para corte e maior volume produzido (FIGURA 2.2).

A FIGURA 2.3 apresenta a distribuição espacial e temporal da programação de colheita anual dos modelos original e ambiental, além da rede rodoviária utilizada para o transporte de madeira ao longo dos anos. Corroborando com os dados apresentados na TABELA 2.3, é percebido visualmente nessa figura que os cenários com maior abrangência de vizinhança entre talhões resultaram em menor quantidade de áreas sem blocos, conforme visto nos mapas na cor preta.

FIGURA 2.3 - ÁREA DA FLORESTA DO ESTUDO DE CASO MOSTRANDO OS BLOCOS DE COLHEITA SELECIONADOS E NÃO SELECIONADOS AO LONGO DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.



FONTE: O autor (2022).

Na TABELA 2.5 são apresentados os resultados relacionados a quantidade e tamanho de blocos selecionados para corte em cada cenário testado. No modelo original, o cenário OM_1.0_A selecionou mais blocos de menor tamanho que os demais cenários testados neste modelo (TABELA 2.5). Em contrapartida, o cenário OM_1.0_1Km e OM_1.0_2Km selecionaram menos blocos, mas com média de área 21% e 42% maior que o cenário OM_1.0_A. No modelo ambiental, os cenários OM_2.0_1Km e OM_2.0_2Km agendaram o mesmo número de blocos com áreas

médias muito similares; no entanto, ambos os cenários planejaram uma área média de bloco 39% maior do que o cenário OM_2.0_A.

TABELA 2.5 - PANORAMA DOS BLOCOS SELECIONADOS EM CADA CENÁRIO OTIMIZADO.

Cenários	Nº clusters disponíveis*	Nº de blocos agendados	Área mínima de bloco (ha)	Área média blocos (ha)	Área máxima de bloco (ha)
OM_1.0_A	79	26	61,3	93,2	196,2
OM_1.0_1Km	113	25	64,6	11,4	208,8
OM_1.0_2Km	546	23	64,6	132,3	265,8
OM_2.0_A	79	24	61,3	101,0	196,2
OM_2.0_1Km	113	20	64,6	139,9	238,8
OM_2.0_2Km	546	20	64,6	140,9	265,8
CM_1.1_1Km	113	21	64,6	115,3	208,8
CM_1.1_2Km	546	20	64,3	121,1	257,9
CM_2.1_1Km	113	18	64,6	134,6	226,4
CM_2.1_2Km	546	19	64,6	127,5	265,8

*Número de blocos gerados *a priori* para os modelos de otimização.

FONTE: O autor (2022).

2.4 DISCUSSÕES

Esse estudo teve como objetivo estabelecer diferentes abordagens de vizinhança entre talhões florestais para a formação de blocos e utilizá-los na solução de cenários de planejamento tático integrado com perspectivas econômicas e ambientais. As diferentes abordagens utilizadas na definição da vizinhança entre talhões representaram uma caracterização mais próxima da realidade operacional prática. Isso porque, a acessibilidade dos talhões foi definida a partir da malha rodoviária florestal e, os talhões separados por limitações espaciais, como rios ou reservas naturais, não foram classificados como vizinhos. Após a otimização dos cenários de programação florestal, os resultados mostraram que quanto mais abrangente a definição de vizinhança para a formação dos blocos maior o retorno econômico (VPL), maior a quantidade de área de corte disponível para seleção do modelo, maior o tamanho médio dos blocos, menor o número de talhões isolados e menor o custo de manutenção de estradas. Neste último caso, a comparação se baseia na proporcionalidade dos custos de manutenção de estradas em relação a área e volume de corte agendado em cada cenário. Öhman e Eriksson (2010), Borges et al. (2017) e Heinonen et al. (2018) apresentaram resultados similares estudando a

agregação de talhões em blocos de colheita; no entanto, nenhum deles considerou como parte do modelo matemático os custos de manutenção de estradas.

De acordo com Borges et al. (2017) há um limite no acréscimo da lucratividade dos modelos em relação ao aumento do tamanho das áreas de colheita. Pois quanto mais abrangente os blocos maiores as possibilidades de seleção de unidades florestais com menor valor de crescimento devido a idade e índice de sítio, influenciando em perdas econômicas. No entanto, neste trabalho, esses efeitos foram minimizados através da limitação do tamanho de blocos e a idade mínima e máxima de corte, garantindo que apenas os blocos com idades aptas para serem colhidos pudessem ser selecionados. Ou seja, mesmo que o modelo matemático selecionasse talhões mais jovens em blocos mais abrangentes, há a garantia de que todos os blocos designados para corte sejam compostos por talhões minimamente aptos para serem colhidos.

A metodologia aplicada para a formação dos blocos se caracterizou como bastante flexível para ser implementada em diferentes realidades de manejo florestal, pois ela possibilita a seleção de diferentes combinações e de diferentes tamanhos de blocos conforme requisitos do tomador de decisão e/ ou leis locais. A partir da aplicação do algoritmo de Girvan-Newman, diferentes critérios de seleção de blocos podem ser definidos, variando, por exemplo, a idade e tamanho mínimo e/ ou máximo de área de corte.

No entanto, o algoritmo de Girvan-Newman tem a limitação de desempenho para grandes bases de dados devido ao alto custo computacional relacionado ao cálculo da centralidade entre arestas em determinadas etapas do algoritmo (OLIVEIRA, 2015). Ademais, Fortunato (2010) destaca que o algoritmo pode se tornar bastante lento quando aplicados em grafos esparsos de até 10,000 vértices, visto que o tempo de processamento computacional está intimamente ligado a estrutura de cada grafo.

Os resultados do presente estudo mostraram que os grafos compostos por conexões de forte coesão, como quando consideradas vizinhanças entre talhões mais abrangentes, demandaram mais tempo de processamento. Porém, considerando o tempo de processamento de formação dos blocos em conjunto com o tempo de execução dos modelos matemáticos, todos os cenários resultaram em menos de 3 horas de processamento. Esses resultados indicaram bom desempenho computacional para o processamento dos cenários, uma vez que 3 – 4 horas de

processamento representa um tempo limite máximo razoável atribuído para a resolução desse tipo de problema (como por exemplo, Carvajal et al. (2013), Augustynczik et al. (2016a), Gharbi et al. (2019)).

Devido a enumeração *a priori* dos blocos de colheita, nossa abordagem não garante que os cenários matemáticos contemplaram todas as combinações de blocos possíveis entre o intervalo de área mínima e máxima. Porém, através de uma análise conjunta do tempo de processamento, resultados econômicos e espaciais dos cenários testados, pode-se observar que as soluções geradas foram eficientes e adequadas como base para tomada de decisão. Além de que, para estudos futuros, sugerimos explorar essa abordagem para instâncias e ou períodos maiores para avaliar a desenvoltura dessa metodologia.

Todos os cenários resultaram em soluções factíveis, porém os cenários cuja abordagem para formação dos blocos foi mais abrangente, resultaram em maior retorno econômico. Esses resultados estão atrelados a capacidade de alcance aplicada nessa abordagem, pois ela permite que mais áreas elegíveis para corte sejam consideradas no modelo de otimização além de permitir que mais combinações de blocos sejam enumeradas. Além disso, esses cenários garantem que menos áreas sejam tratadas de maneira empírica pelos tomadores de decisão, uma vez que as áreas classificadas como inativas no modelo poderão ou não ser manejadas para corte. Através da análise da FIGURA 2.3 é possível visualizar a espacialização gerada nos cenários do modelo original e ambiental e, observar que os cenários mais abrangentes apresentaram menor quantidade de áreas inativas, representadas pelas áreas sem bloco (cor preta) e pelas áreas não agendadas pelo modelo matemático (cor cinza).

Quando a restrição ambiental foi integrada nos cenários houve queda no retorno econômico. As limitações de corte de áreas adjacentes tornam o problema mais restrito implicando na lucratividade do problema (DONG et al., 2018, AUGUSTYNCZIK, 2021). Apesar dessa consideração, o manejo orientado para a conservação deve ser adaptado conforme as condições locais e garantir o mínimo de compensação para a lucratividade com o maior benefício ecológico possível (AUGUSTYNCZIK, 2021). No entanto, determinar o arranjo ideal das ações de manejo é considerada uma tarefa muito complicada (ROSS; TÓTH, 2016). Áreas muito grandes de corte podem aumentar a exposição solar, reduzir a umidade local, aumentar o risco de danos causados pelo vento, erosão do solo, diminuir a qualidade

da água e deteriorar a paisagem natural (GUSTAFSSON et al., 2012, ROSS; TÓTH, 2016, MOBTAKER et al., 2018). Por outro lado, porém, quando as colheitas são pequenas, fragmentadas e dispersas, também podem perturbar a estrutura interna da floresta (GUSTAFSON; CROW, 1994). Há também espécies que se beneficiam de paisagens ricas em bordas enquanto outras são severamente afetadas por habitats muito fragmentados (ROSS; TÓTH, 2016). Além disso, a abertura de espaços gerados pela colheita pode reduzir o risco de incêndios florestais e inibir a propagação de doenças e infecções (RÖNNQVIST et al., 2015).

Portanto, tendo em vista a garantia da sustentabilidade ambiental e econômica do negócio, destaca-se a relevância do uso conjunto das premissas de área mínima e máxima de blocos de colheita e restrição de adjacência. Isso porque, a restrição de área mínima de bloco é capaz de garantir a cobertura mínima dos custos com o deslocamento da equipe e maquinário até o local de colheita e auxilia na minimização dos impactos negativos gerados no interior de pequenos fragmentos. Enquanto, a restrição de área máxima de corte e as restrições adjacentes limitam a formação de grandes áreas abertas e auxiliam na minimização dos impactos ambientais. No entanto, essas restrições ambientais acentuam as limitações de resolução do modelo matemático.

2.5 CONCLUSÕES

O uso combinado de definições de vizinhança entre talhões adjacentes e baseada em uma distância máxima aumentam as possibilidades de formações de maiores blocos de colheita e reduzem o índice de talhões isolados. Além disso, essa abordagem pode ser utilizada para qualquer estrutura florestal, com destaque para florestas compostas por talhões pequenos e dispersos.

A metodologia aplicada para a formação dos blocos se caracterizou como flexível para ser implementada em diferentes realidades de manejo florestal, pois ela possibilita a seleção de diferentes combinações e tamanhos de blocos conforme requisitos do tomador de decisão e/ ou leis locais. A partir da aplicação do algoritmo de *Girvan-Newman*, diferentes critérios de seleção de blocos podem ser estabelecidos através da variação da idade de corte, tamanhos de áreas mínima e/ ou máxima de corte. Além disso, a metodologia aplicada neste estudo possibilitou resolver um

problema de planejamento tático de colheita e transporte, integrando preocupações econômicas e ambientais dentro de um tempo de processamento razoável.

De modo geral, os resultados apresentam que, quanto mais abrangente a definição de vizinhança para a formação dos blocos, tende-se a obtenção de maior retorno econômico (VPL), a quantidade de área de corte disponível para seleção do modelo e o tamanho médio dos blocos, bem como menor será o número de talhões isolados e o custo de manutenção de estradas.

REFERÊNCIAS

ANDALRAFT, N. et al. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation. **Operational Research**, v. 51, n. 4, p. 613–628, 2003.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D. et al. Promoting harvesting stands connectivity and its economic implications in Brazilian forest plantations applying integer linear programming and simulated annealing. **Forest Policy and Economics**, v. 73, p. 120–129, 2016.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D. Habitat amount and connectivity in forest planning models: Consequences for profitability and compensation schemes. **Journal of Environmental Management**, v. 283, n. 2021, p. 111982, 2021.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming. **Journal of Forest Economics**, v. 24, p. 72–81, 2016.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Implementing minimum area harvesting blocks in an optimized forest planning model. **Revista Árvore**, v. 41, n. 1, p. e410118, 2017.

BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2–4, p. 145–173, 2005.

BELLAVENUTTE, P.; CHUNG, W.; DIAZ-BALTEIRO, L. Partitioning and solving large-scale tactical harvest scheduling problems for industrial plantation forests. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, p. 811–818, 2020.

BETTINGER, P.; BOSTON, K. Forest planning heuristics-current recommendations and research opportunities for s-metaheuristics. **Forests**, v. 8, n. 12, p. 1–10, 2017.

BORGES, J. G. et al. Strategic management scheduling. In: BORGES, J. G. et al. (Eds.). **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 171–238.

BORGES, J. G.; HOGANSON, H. M.; ROSE, D. W. Combining a decomposition

strategy with dynamic programming to solve spatially constrained forest management scheduling problems. **Forest Science**, v. 45, n. 2, p. 201–212, 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**, v. 233, n. 3, p. 700–710, 2014.

BORGES, P.; KANGAS, A.; BERGSENG, E. Optimal harvest cluster size with increasing opening costs for harvest sites. **Forest Policy and Economics**, v. 75, p. 49–57, 2017.

CARVAJAL, R. et al. Imposing connectivity constraints in forest planning models imposing connectivity constraints in forest planning models. **Operational Research**, v. 61, n. 4, p. 824–836, 2013.

CHUNG, W. et al. **User ' s guide to SNAP for ArcGIS ®: ArcGIS interface for scheduling and network analysis program** U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Portland. Disponível em: <<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/39933>>.

COSTA, S. **Algoritmo de Girvan & Newman aplicado à formação de blocos de colheita - Planejamento Florestal Otimizado utilizando o R**. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/algoritmo-de-girvan-newman-aplicado-à-formação-blocos-sérgio-costa?articleId=6646037556158877696>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

DEHMER, M.; BASAK, S. C. **Statistical and machine learning approaches for network analysis**. Wiley, 2012.

DONG, L. et al. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. **Silva Fennica**, v. 52, n. 1, 2018.

FORTUNATO, S. Community detection in graphs. **Physics Reports**, v. 486, n. 3–5, p. 75–174, 2010.

GHARBI, C.; RÖNNQVIST, M.; CARLE, M.-A. A new mixed-integer programming model for spatial forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, p. 1493–1503, 2019.

GIRVAN, M.; NEWMAN, M. E. J. Community structure in social and biological networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 99, n. 12, p. 7821–7826, 2002.

GOYCOOLEA, M. et al. Evaluating Approaches for Solving the Area Restriction Model in Harvest Scheduling. **Forest Science**, v. 55, n. 2, p. 149–165, 2009.

GUSTAFSON, E. J.; CROW, T. R. Modeling the effects of forest harvesting on landscape structure and the spatial distribution of cowbird brood parasitism. **Landscape Ecology**, v. 9, n. 4, p. 237–248, 1994.

GUSTAFSSON, L. et al. Retention forestry to maintain multifunctional forests: A world perspective. **BioScience**, v. 62, n. 7, p. 633–645, 2012.

HEINONEN, T. et al. Aggregating microsegments into harvest blocks by using spatial optimization and proximity objectives. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 1184–1193, 2018.

JIAO, Z. et al. Module dividing for brain functional networks by employing betweenness efficiency. **Multimedia Tools and Applications**, v. 79, n. 21–22, p. 15253–15271, 2020.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives — discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 18, p. 1–30, 1977.

MOBTAKER, A. et al. Minimizing spatial dispersion of forest harvest areas using spectral clustering and set covering modelling. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 1563–1576, 2018.

MYLAVARAPU, S. P.; GOVINDARAJAN, S. IDK my friends: Link analysis on social networks to mine surprise connections. In: BALUSAMY, S. et al. (Eds.). **Computational intelligence, cyber security and computational models. Models and Techniques for Intelligent Systems and Automation**. ICC3 2019 ed. Singapore: Springer, 2020. v. 1213p. 29–35.

NADERIALIZADEH, N.; CROWE, K. A.; ROUHAFZA, M. Solving the integrated forest harvest scheduling model using metaheuristic algorithms. **Operational Research**, 2020.

NEWMAN, M. E. J. Analysis of weighted networks. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 70, n. 5, p. 9, 2004a.

NEWMAN, M. E. J. Fast algorithm for detecting community structure in networks. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 69, n. 6, p. 5, 2004b.

NEWMAN, M. E. J. Modularity and community structure in networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 23, p. 8577–8582, 2006.

NEWMAN, M. E. J.; GIRVAN, M. Finding and evaluating community structure in networks. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 69, n. 2, p. 1–16, 2004.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, p. 77–89, 2010.

OLIVEIRA, M. D. B. DE. **On business analytics : Dynamic network analysis for descriptive analytics and multicriteria decision analysis for prescriptive analytics**. Universidade do Porto, 2015.

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

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

ROSS, K. L.; TÓTH, S. F. A model for managing edge effects in harvest scheduling using spatial optimization. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 7, p. 646–654, 2016.

ROSS, K. L.; TÓTH, S. F.; JAROSS, W. S. Forest harvest scheduling with endogenous road costs. **Interfaces**, v. 48, n. 3, p. 1–11, 2018.

SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, G. Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimised harvest scheduling. **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 5, p. 651–657, 2012.

TÓTH, S. F. et al. A strengthening procedure for the path formulation of the area-based adjacency problem in harvest scheduling models. **Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences**, v. 4, n. 1, p. 24–49, 2012.

WOLSEY, L. A. **Integer Programming**. New York. 1998.

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P. Focal-point aggregation under area restrictions through spatially constrained optimal harvest scheduling. **Forest Science**, v. 65, n. 2, p. 164–177, 2019.

3 CAPÍTULO 2 – AGREGAÇÃO DE BLOCOS DE COLHEITA FLORESTAL SUJEITO À CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS E AMBIENTAIS

RESUMO

A programação da colheita florestal tem se tornado mais complexa ao longo dos anos. Além de avaliações econômicas tradicionais, preocupações relacionadas com as questões espaciais e ambientais tem expandido gradativamente. No entanto, dependendo da metodologia empregada na descrição do problema que considere restrições espaciais, pode haver uma demanda considerável de processamento computacional. Dessa maneira, este estudo utilizou uma abordagem de resolução do problema em duas etapas. A primeira etapa foi composta pela formação do conjunto de blocos de colheita *a priori* restritos à combinação de talhões que respeitassem as premissas de área mínima e máxima. Em seguida, na segunda etapa foi implementado um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) com objetivo de maximizar a receita de um planejamento integrado sujeito à diferentes prescrições de agregação de blocos de colheita e restrições ambientais. De modo geral, os cenários implementados foram capazes de conciliar o uso de restrições de agregação com restrições ambientais. No entanto, quanto mais agregada a distância entre blocos e incorporada a restrição ambiental, menos flexível se tornou o modelo matemático, tendendo a redução de áreas agendadas e menor retorno econômico. Apesar da redução da rentabilidade, outros benefícios monetários resultantes da aplicação dessa abordagem podem ser obtidos em operações subsequente que não foram considerados nesse estudo. Além do mais, melhorias nos modelos apresentados podem ser feitas, como é o caso de flexibilizar as restrições de idade de maneira que o modelo matemático seja capaz de ampliar as alternativas de seleção de áreas de corte.

Palavras-chave: Algoritmo de Girvan-Newman 1. Planejamento florestal tático 2. restrição de adjacência 3. Programação Linear Inteira Mista 4.

3.1 INTRODUÇÃO

O planejamento hierárquico aplicado para a resolução de problemas de programação de colheita de madeira tem sido tradicionalmente utilizado por gestores florestais como auxílio à tomada de decisão (BELAVENUTTI; ROMERO; DIAZ-BALTEIRO, 2019). Essa abordagem decompõe o problema em decisões estratégicas, táticas e operacionais, de maneira que os objetivos do mais alto nível sejam mantidos nos planejamentos subsequentes, variando apenas em uma escala de informações mais detalhadas e de menor período de tempo. Tipicamente, o planejamento tático de colheita aborda dados espaciais que determinam onde e quando os talhões devem ser cortados, de modo a atender às demandas temporais de madeira (RÖNNQVIST

et al., 2015). Além disso, o planejamento tático pode incluir decisões de construção e manutenção de estradas (MCDILL, 2014), uma vez que elas garantem o acesso às áreas de corte (RÖNNQVIST et al., 2015) e bem como, considerar preocupações relacionadas ao padrão espacial da paisagem.

As decisões relacionadas à seleção de estradas florestais limitadas a um orçamento anual são fatores interligados às decisões de quais áreas de colheita devem ser selecionadas em cada ano (MOBTAKER et al., 2020). Isso porque os custos associados a colheita e estradas são elevados, e podem impactar na viabilidade de um plano de manejo (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011). Portanto, torna-se pertinente integrar decisões de agendamento da colheita ao planejamento de estradas em um único modelo conforme inicialmente apresentadas por Weintraub & Navon (1976) e Kirby et al. (1986).

Além de fatores econômicos, o cuidado com o ambiente tem se tornado um fator preponderante na sustentabilidade do mercado florestal, que vem reconhecendo a importância em minimizar os impactos das atividades em termos de erosão e estética da paisagem (MARQUES, et. al., 2014). Com o aumento das preocupações relacionadas ao padrão espacial da paisagem nas funções ecológicas, os planos florestais têm incluído restrições espaciais nos seus modelos, como por exemplo, a implementação de restrição de *green-up* e restrições de adjacências (BETTINGER; BOSTON, 2017). As restrições de adjacência de colheita são usadas para limitar as áreas de corte raso por operações de colheita e para restringir quaisquer aglomerados vizinhos de serem colhidos simultaneamente (RÖNNQVIST *et al.*, 2015, MCDILL *et al.*, 2016). Enquanto isso, as restrições de *green-up* controlam um período mínimo de tempo antes que as áreas adjacentes possam ser colhidas (DONG et al., 2015).

Tradicionalmente, as restrições de adjacência se baseiam na abordagem baseada em área, referida por Murray (1999) como Modelo de Restrição de Área (ARM). Essa abordagem permite a colheita de blocos ou áreas contínuas que não excedam um tamanho máximo definido. Muitos estudos têm aplicado o uso de restrição de adjacência para o agendamento da colheita florestal, como por exemplo, McDill, Rebain e Braze (2002), Tóth et al. (2012), Borges et al. (2015), Augustynczyk, Arce e Silva (2016), Dong et al. (2018), Gharbi, Rönnqvist e Carle (2019). No entanto, essa abordagem não limita a formação de pequenos fragmentos, possibilitando, de acordo com Kurttila (2001), a redução do tamanho do habitat e ao enfraquecimento das conexões entre eles. Desde modo, o uso de requisitos de tamanho mínimo de

fragmento no planejamento florestal pode se caracterizar como uma alternativa necessária para a minimização dos impactos ambientais (REBAIN; MCDILL, 2003). Além do mais, ela pode permitir o abatimento mínimo dos custos relacionados ao deslocamento de uma equipe entre blocos de colheita.

Apesar da relevância de se integrar um plano de colheita junto ao planejamento de estradas, tanto quanto, de se aplicar restrições espaciais em um problema florestal, a resolução desses tipos de problemas pode se tornar complexa em termos de tempo polinomial não determinístico (*NP-Hard*), dado ao grande tamanho e número de variáveis do problema. Além do mais, dependendo da metodologia empregada na descrição do problema e da natureza combinatória pertinentes às restrições espaciais, pode-se haver uma quantidade significativa de processamento computacional (DONG et al., 2015) e inviabilidades frequentes (AUGUSTYNCZIK; ARCE; SILVA, 2016).

Nesse sentido, como explorar todas as alternativas de agrupamentos de talhões para formação de blocos de colheita não seja uma opção tratável devido ao tamanho do problema e da dificuldade de resolução, propôs-se nesse estudo uma abordagem de resolução em duas etapas. A primeira etapa foi composta pela formação do conjunto de blocos de colheita *a priori* restritos à combinação de talhões que respeitassem as premissas de área mínima e máxima. Em seguida, na segunda etapa foi implementado um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) com objetivo de maximizar a receita de um planejamento integrado sujeito à diferentes prescrições de agregação de blocos de colheita e restrições ambientais. A agregação de áreas de colheita possibilita que operações de colheita se tornem mais eficientes, uma vez que tendem a reduzir os custos e consumo de tempo de deslocamento de máquinas e equipes (AUGUSTYNCZIK; ARCE; SILVA, 2016, MOBTAKER et al., 2018).

Portanto, a contribuição acadêmica deste artigo consiste na proposta de apresentar um modelo adaptável à diversas jurisprudências e condicionantes que regulamentam o manejo florestal no mundo e que buscam abordar aspectos tanto da rentabilidade quanto da ecologia da floresta. Isso porque, os parâmetros desse modelo são passíveis de ajustes conforme a necessidade de cada caso, auxiliando a tomada de decisão.

A hipótese desse trabalho consiste em avaliar se os modelos são capazes de:

- (I) agregar e limitar a colheita de blocos adjacentes, considerando particularidades

ambientais; de forma a atender às condicionantes econômicas e ambientais, respectivamente; (II) assegurar a produção mínima de madeira ao longo do horizonte de planejamento; e (III) assegurar a seleção de áreas com idades de corte.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Nesse estudo foram abordadas duas etapas para modelar e resolver o problema definido, conforme pode ser analisado na

Figura 3.1. A primeira etapa foi composta pela formação do conjunto de blocos de colheita *a priori*, conforme descrito no subitem 1.4.1 da tese. Em seguida, a segunda etapa visou maximizar a receita e testar diferentes níveis de agregação de blocos de colheita e restrições ambientais para cada período do horizonte de planejamento. No entanto, para se ter conhecimento do menor valor de agregação factível entre blocos, foi implementado um novo modelo matemático (Modelo 1) cuja função objetivo visou minimizar a distância entre blocos.

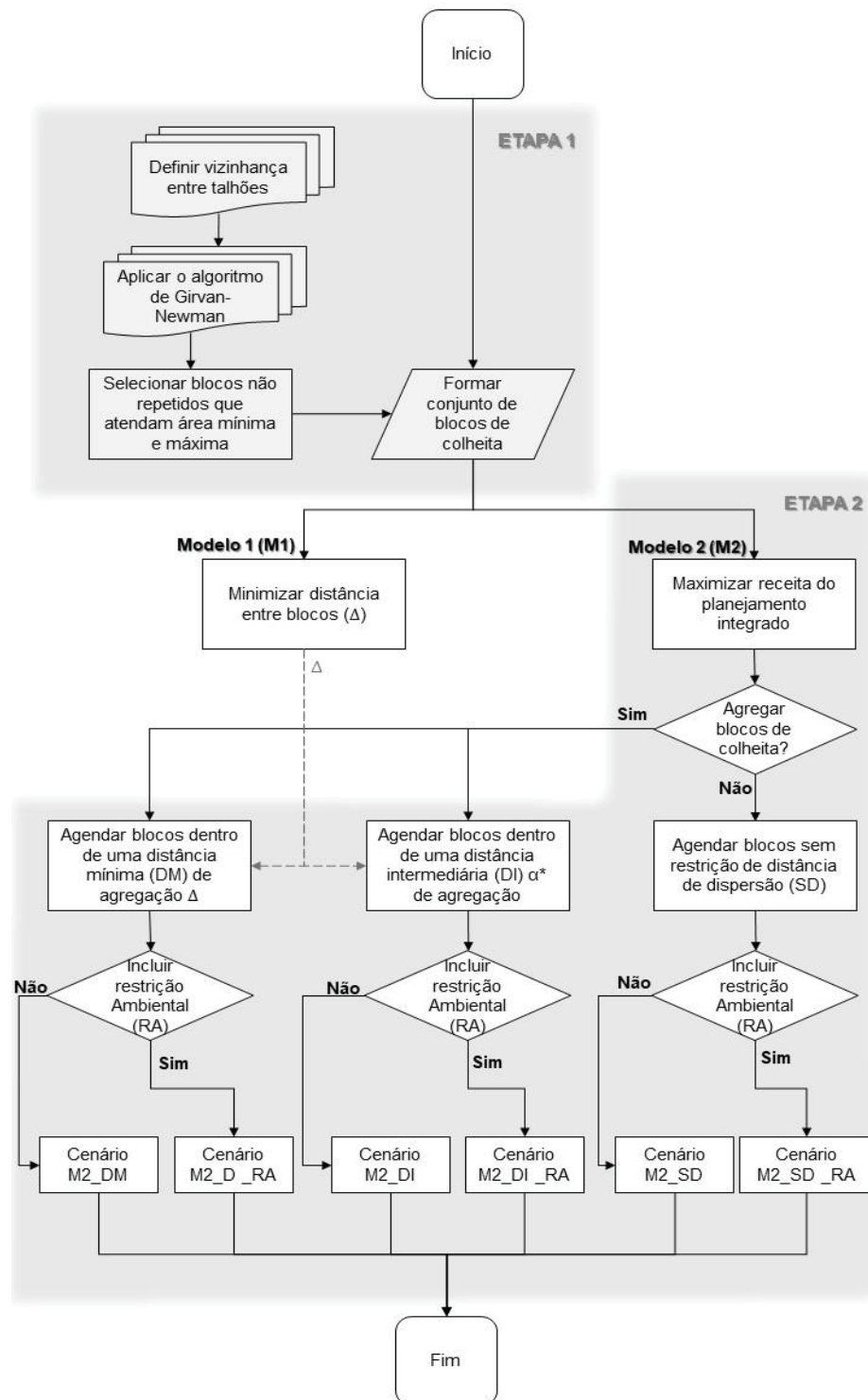
O processamento do Modelo 1 não foi um limitador para a resolução do Modelo 2, porém auxiliou na definição do parâmetro de distância mínima factível entre blocos para o Modelo 2. Dessa maneira, a partir do processamento do Modelo 1, foram definidos três cenários gerais de agregação entre blocos para o Modelo 2, os quais foram subdivididos em cenários que utilizaram e não consideraram a restrição ambiental no modelo matemático.

No primeiro conjunto de cenários gerais de agregação de blocos do Modelo 2, o parâmetro de distância mínima de agregação entre blocos foi equivalente ao valor otimizado do Modelo 1. Enquanto, no segundo conjunto de cenários gerais foi estabelecida uma premissa mais flexível de agregação de blocos de colheita, definida conforme a média entre a maior distância entre dois blocos e a distância mínima encontrada no Modelo 1. Por último, no terceiro conjunto de cenários não foram considerados requisitos de agregação entre blocos.

A abordagem de cenários com e sem o uso de restrições ambientais foi definida uma vez que dependendo da formação florestal da área analisada, o uso da restrição que limita o corte de blocos adjacentes possa não ser necessária. Além disso a aplicação da restrição ambiental tende a deixar o modelo mais restrito e de difícil resolução. Ou seja, foram gerados uma gama de planos que possibilitam ser

comparados quanto a lucratividade e benefício ecológico relacionados a distribuição espacial do agendamento da floresta.

FIGURA 3.1 - REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO PROBLEMA.



* $\alpha = (\text{Distância máxima entre dois blocos} - \Delta) / 2$

FONTE: O autor (2022).

3.2.1 Formulação matemática

A Programação Linear Inteira Mista (PLIM) foi aplicada para otimizar o layout espacial e temporal das ações de gerenciamento de um planejamento de colheita e estradas florestais. Na sequência, são apresentados todos os índices, conjuntos de dados, parâmetros e variáveis usados para formular ambos os modelos matemáticos. E, por último, são descritas as formulações dos modelos.

Índices

- i, i' : Talhões florestais: $1, \dots, |H|$
- j : Períodos do horizonte de planejamento: $1, \dots, |J|$
- p : Sortimentos de madeira: $1, \dots, |P|$
- k, k' : Blocos florestais: $1, \dots, |K|$
- m, n : Segmentos de estradas potenciais que descrevem um arco entre os nós
 $m \text{ e } n \in N$

Conjuntos

- H : Conjunto de talhões da floresta
- J : Conjunto de períodos do horizonte de planejamento
- P : Conjunto de sortimentos de madeira
- C_k : Conjunto de blocos florestais k
- O : Conjunto de talhões que não pertencem a nenhum bloco florestal
- K : Conjunto de blocos que atendem a premissa de área mínima e máxima de abertura
- A_i : Conjunto de todos os talhões de corte adjacentes ao talhão i
- B_i : Conjunto de blocos de colheita que contém o talhão i
- $\bar{B}_i$: Conjunto de blocos de colheita adjacentes ao talhão i and $\bar{B}_i \neq B_i$
- N : Conjunto de nós da rede de estradas florestais
- Y : Conjunto de possíveis arcos (m, n)
- $N_{\bar{c}}$: Conjunto de arcos conectados ao destino final (fábrica) $\bar{c}$
- D : Conjunto de pares ordenados de blocos k e k' tais que $\delta_{kk'} > \Delta_{bloco}$
- H_n : Conjunto de talhões que contém o nó n

Parâmetros

- $\delta_{kk'}$: Distância real entre o bloco k e k'
- Δ_{bloco} : Distância máxima que um bloco pode estar de outro bloco em um mesmo período
- l_{ij} : Valor presente líquido relacionado às receitas e custos da colheita florestal caso o talhão i seja cortado no período j (R\$/ano)
- v_{ijp} : Volume do sortimento de madeira p produzido no talhão i no período j (m³/ano)
- ω_{ij} : Volume total de madeira produzido no talhão i no período j (m³/ano)
- τ_p : Demanda mínima anual do sortimento p (m³/ano)
- σ : Capacidade de produção máxima (m³/ano)
- n_i : Idade do talhão i no primeiro período do horizonte de planejamento (anos)
- η : Idade mínima de corte (anos)
- β : Idade máxima de corte (anos)

- g : Período de *green-up* entre talhões cortados adjacentes (anos)
 c_{mnj} : Custo presente de manutenção de estradas (R\$) caso o segmento de estrada entre os nós m e n seja selecionado no período j (R\$/ano)
 s_{mn} : Fluxo máximo no arco (m, n) caso seja habilitado
 U : Área total máxima de colheita permitida para seleção no planejamento (ha)

Variáveis de decisão

- Δ : Distância mínima de agregação entre blocos
 $y_{kk'j}$: Variável binária que assume o valor 0 caso $\delta_{kk'} > \Delta$
 x_{ij} : Variável binária que assume o valor 1 caso o talhão i seja selecionado para corte no período j , e 0 caso contrário
 b_{kj} : Variável binária que assume valor 1 caso o bloco k seja selecionado para corte no período j , e 0 caso contrário
 z_{mnj} : Variável binária que assume valor 1 caso o segmento de estrada entre os nós m e n seja selecionado no período j , e 0 caso contrário
 f_{mnj} : Fluxo anual de madeira (m³/ano) transportado ao longo do segmento de estrada entre os nós m e n no período j

Conforme mencionado anteriormente, o Modelo 1 foi estruturado com o intuito de encontrar a menor distância real factível entre blocos de colheita. Ademais, esse modelo matemático foi sujeito ao atendimento de premissas de abastecimento mínimo, produção máxima, idade mínima e máxima de corte e, bem como, seleção de blocos de colheita pré-definidos, conforme formulado abaixo.

$$\text{Minimize: } \Delta \quad (1)$$

$$\delta_{kk'} * y_{kk'j} \leq \Delta \quad \forall k, k' \in K, \forall k \neq k', \forall j \in J \quad (2)$$

$$b_{kj} + b_{k'j} - y_{kk'j} \leq 1 \quad \forall k, k' \in K, \forall k \neq k', \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in H \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{|H|} (v_{ijp} \cdot x_{ij}) \geq \tau_p \quad \forall j \in J, p = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{|H|} (\omega_{ij} \cdot x_{ij}) \leq \sigma \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$(n_i + j - 1) \cdot x_{ij} \geq \eta \cdot x_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (7)$$

$$(n_i + j - 1) \cdot x_{ij} \leq \beta \cdot x_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{i \in C_k} x_{ij} \geq |C_k| \cdot b_{kj} \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (9)$$

$$\sum_{k \in B_i} b_{kj} = x_{ij} \quad \forall i \in H, \forall j \in J \quad (10)$$

$$x_{ij}, b_{kj}, y_{kk'j} \in \{0,1\} \text{ e } \Delta \geq 0 \quad (11)$$

A função objetivo (1) busca encontrar a distância mínima que blocos de colheita possam ser agendados para corte. O conjunto de restrições (2) e (3) são adaptações baseadas em Ferrari, Arce e Pelissari (2019), as quais garantem que dois blocos de colheita não sejam agendados quando $\delta_{kk'} > \Delta$, o que promove, consequentemente, a agregação de blocos de colheita dentro de um mesmo período de planejamento. Além disso, ambas restrições possuem uma variável gatilho $y_{kk'j}$ que assumem valor 0 sempre que a $\delta_{kk'} > \Delta$, garantindo que blocos mais distantes que Δ nunca sejam selecionados em um mesmo ano. A restrição (4) garante que cada talhão seja designado para corte apenas uma vez durante o horizonte de planejamento. A restrição (5) assegura a produção mínima anual do sortimento de madeira para processo. A restrição (6) estabelece a capacidade máxima de produção em cada período j . As inequações (7) e (8) estabelecem que os talhões só podem ser colhidos dentro do intervalo de idades mínima e máxima de corte estabelecido. O conjunto de restrições (9) e (10), são adaptações baseadas em Rebain e McDill (2003) e Augustynczyk, Arce e Silva (2017) que garantem que blocos de colheita sejam selecionados ao longo do horizonte de planejamento. A restrição (9) garante que caso um bloco k seja selecionado para corte no período j , todos os talhões i contidos no respectivo bloco k sejam selecionados. A restrição (10) garante que cada talhão designado para corte pertença a apenas um bloco de colheita. A imposição de que apenas um bloco de colheita seja selecionado para cada talhão, é uma das mudanças feitas em relação à proposta dos autores citados acima. Esse conjunto de restrições garantem que os blocos de colheita não se sobreponham. Por fim, o conjunto de restrições (11) impõem a integralidade e não negatividade às variáveis de decisão envolvidas no modelo.

Como a abordagem de agregar blocos de colheita não garante que a receita do planejamento florestal seja maximizada, foi estruturado um novo modelo matemático, classificado como Modelo 2. Nesse modelo, foram consideradas a agregação de blocos de colheita como uma restrição e definiu-se como objetivo principal a maximização do retorno financeiro considerando receitas e custos gerados

pela colheita e estradas florestais. Além do mais, considerou-se como uma das restrições do modelo, a limitação de corte de blocos adjacentes, tendo em vista a minimização dos impactos gerados pela intervenção florestal.

Maximize:

$$\sum_{i=1}^{|H|} \sum_{j=1}^{|J|} (l_{ij} \cdot x_{ij}) - \sum_{(m,n) \in Y} \sum_{j=1}^{|J|} (c_{mnj} \cdot z_{mnj}) \quad (12)$$

$$b_{kj} + b_{k'j} \leq 1 \quad \forall (k, k') \in D, \forall j \in |J| \quad (13)$$

$$f_{mnj} = \sum_{i=1}^{|H|} (\omega_{ij} \cdot x_{ij}) \quad \forall (m, n) \in N_{\bar{c}}, \forall i \in H, \forall j \in J \quad (14)$$

$$\sum_{i \in H_n} (\omega_{ij} \cdot x_{ij}) + \sum_{(m,n) \in Y} f_{mnj} - \sum_{(n,o) \in Y} f_{noj} = 0 \quad \forall n \in N \setminus \{\bar{c}\}, \forall j \in J \quad (15)$$

$$f_{mnj} + f_{nmj} \leq s_{mn} \cdot z_{mnj} \quad \forall (m, n) \in Y, \forall j \in J \quad (16)$$

$$\sum_{k \in B_i} b_{kj} + \sum_{\substack{k' \in B_i \\ k' \notin B_i}} b_{k'(j+g)} \leq 1 \quad \forall i \in H, \forall i \notin O, \forall j \in J, \quad g = 0, \forall (j + g) \leq |J| \quad (17)$$

$$x_{ij}, b_{kj}, z_{mnj} \in \{0,1\} \text{ e } f_{mnj} \geq 0 \quad (18)$$

A nova função objetivo (12) teve como propósito maximizar os valores presentes das receitas de colheita florestal menos os custos descontados de manutenção de estradas. O primeiro conjunto de somatório representa o valor total da receita menos os custos operacionais relacionados à colheita florestal. Em contrapartida, o segundo somatório expressa o custo fixo presente total de manutenção das estradas utilizadas para o acesso e escoamento de madeira. Essa premissa, no entanto, não considera as eventuais manutenções realizadas em períodos anteriores. Nesse modelo foram utilizados o mesmo conjunto de restrições de (4) à (10) que o Modelo 1 e, acrescentadas novas restrições que variaram de (13) à (18).

Para o Modelo 2 ser capaz de agregar blocos de colheita, foi inserida a restrição (13). Nessa restrição são executados apenas o conjunto de pares ordenados

de blocos k e k' que respeitam a condição de $\delta_{kk'} > \Delta_{bloco}$ e permite-se que apenas um dos blocos possa ser selecionado. Ou seja, a restrição, indiretamente, agrega os blocos mais próximos, uma vez que blocos que possuem distância entre si acima de Δ não poderão ser selecionados simultaneamente. Além do mais, através do uso da condição $\delta_{kk'} > \Delta_{bloco}$ é reduzido espaço de busca de solução do modelo, possibilitando obter vantagens de processamento computacional.

O conjunto de restrições (14) à (16) estão relacionados às limitações de estradas. A equação (14) garante que o nó conectado ao destino final da rede de estrada (fábrica) receba o volume total produzido pelos talhões selecionados em cada período. O conjunto de restrições (15) representam as equações de equilíbrio de fluxo de volume para todos os nós que não estão conectados ao destino final (BORGES et al., 2014, BELLAVENTTE; CHUNG; DIAZ-BALTEIRO, 2020). Isto é, esta equação garante que volume total de entrada proveniente de cada talhão florestal associado aos nós conectados à rede de estradas (f_{mnj} , f_{noj}) sejam igualados ao volume total que deixa o nó, em um dado período j (BORGES et al., 2014). Isso garante que todo volume de madeira produzido nas unidades de manejo agendadas para corte seja encaminhado pela rede de estradas até chegarem ao destino final na rede. O conjunto de restrições (16) garantem acionar o segmento de estrada m e n se houver fluxo de madeira diferente de zero, o qual permanece aberto e disponível durante o período j (BORGES et al., 2014, BELLAVENTTE; CHUNG; DIAZ-BALTEIRO, 2020). O *Big-M* representa um arbitrário grande número.

Tendo em vista considerar o padrão da paisagem nas funções ecológicas, a restrição (17) foi incluída com o objetivo de limitar que blocos contíguos sejam colhidos simultaneamente durante um mesmo período de planejamento. Por fim, a restrição (18) força que as variáveis x_{ij} , b_{kj} e z_{mnj} assumam valores inteiros binários e que as variáveis de decisão representadas por f_{mnj} resultem em valores não negativos no modelo.

Os modelos foram escritos em linguagem *Python* e resolvidos via *Gurobi* 9.0.3, em um computador *Intel®* Core™ i7-8550U 2.00 GHz de processador e 8 GB de RAM. Para a resolução de cada cenário, foi definido um tempo de processamento computacional máximo de três horas.

3.2.2 Estudo de caso

O estudo de caso foi fundamentado em dados reais pertencentes a uma empresa de base florestal localizada na região Sul do Brasil, conforme descrito previamente no subitem 1.4.3 da tese. Para a formação dos blocos *a priori* foi considerada a abordagem mais flexível de definição de vizinhança entre talhões, onde talhões adjacentes diretos e que estejam até 2 Km de distância real entre centroides são considerados talhões vizinhos. Além disso, os blocos de colheita seguiram a condição estabelecida pelo proprietário de tamanhos mínimo e máximo de corte de 60 e 300 ha, respectivamente, bem como de idades mínima e máxima de corte (9 e 18 anos).

Para investigar as implicações espaciais e econômicas das abordagens de agregação de blocos de colheita e, bem como, o uso de limitações ambientais foram criados os seguintes cenários de otimização, conforme apresentados na TABELA 3.1.

TABELA 3.1 - VISÃO GERAL DOS CENÁRIOS DE OTIMIZAÇÃO.

Modelo	Cenário	Distância agregação (Km)	Restrição ambiental	Função Objetivo	Restrições
1	M1_DM	Mínima	-	1	2 - 11
	M2_DM	Mínima	-	12	4 - 10, 13 - 16 e 18
2	M2_DI	Intermediária	-	12	4 - 10, 13 - 16 e 18
	M2_SD	Sem	-	12	4 - 10, 13 - 16 e 18
	M2_DM_RA	Mínima	X	12	4 - 10 e 13 - 18
	M2_DI_RA	Intermediária	X	12	4 - 10 e 13 - 18
	M2_SD_RA	Sem	X	12	4 - 10 e 13 - 18

M1 – Modelo 1; M2 – Modelo 2; DM - Distância Mínima de agregação; DI - Distância Intermediária de agregação; SD – Sem Distância de agregação; RA – Restrição Ambiental.

FONTE: O autor (2022).

3.3 RESULTADOS

A partir da aplicação do algoritmo de Girvan-Newman para os cinco anos de planejamento, foram criados 703.855 blocos de colheita *a priori*, os quais demandaram 10.052,42 segundos de processamento computacional. No entanto, ao se aplicar os requisitos de seleção de área mínima e máxima de bloco e eliminação dos agrupamentos repetidos do conjunto de dados, remanesceram 546 blocos

florestais exclusivos, cujo tempo computacional de seleção pode ser considerado desprezível.

A TABELA 3.2 apresenta os resultados da otimização para todos os modelos matemáticos e cenários testados. Por conta do tamanho e complexidade do Modelo 1, o qual foi formulado para obter a menor distância de agregação entre blocos, este demandou 4.098,91 segundos de processamento computacional. Enquanto, todos os demais cenários pertencentes ao Modelo 2 resultaram em menos de um minuto de execução computacional e formaram problemas expressamente menores.

TABELA 3.2 - RESULTADO DE OTIMIZAÇÃO PARA TODOS OS CENÁRIOS.

Cenário	Função objetivo	Tempo (s)	GAP (%)	Nº restrições	Nº variáveis binárias	Nº variáveis contínuas
M1_DM	19,83 Km	4.098,91	0,0%	2.991.320	1.494.605	1
M2_DM	100,0 *	16,22	0,0%	432.715	33.845	27.090
M2_DI	109,3 *	8,71	0,0%	218.745	33.845	27.090
M2_SD	113,9 *	13,66	0,0%	34.665	33.845	27.090
M2_DM_RA	Infactível	-	-	-	-	-
M2_DI_RA	101,6 *	9,47	0,0%	222.545	33.845	27.090
M2_SD_RA	106,8 *	5,19	0,0%	38.465	33.845	27.090

* Por questões de confidencialidade, os resultados se expressam em termos relativos considerando por base o valor total do M2_DM cujo valor foi arbitrado em 100, e nos demais, foi mantida a proporcionalidade dos valores reais.

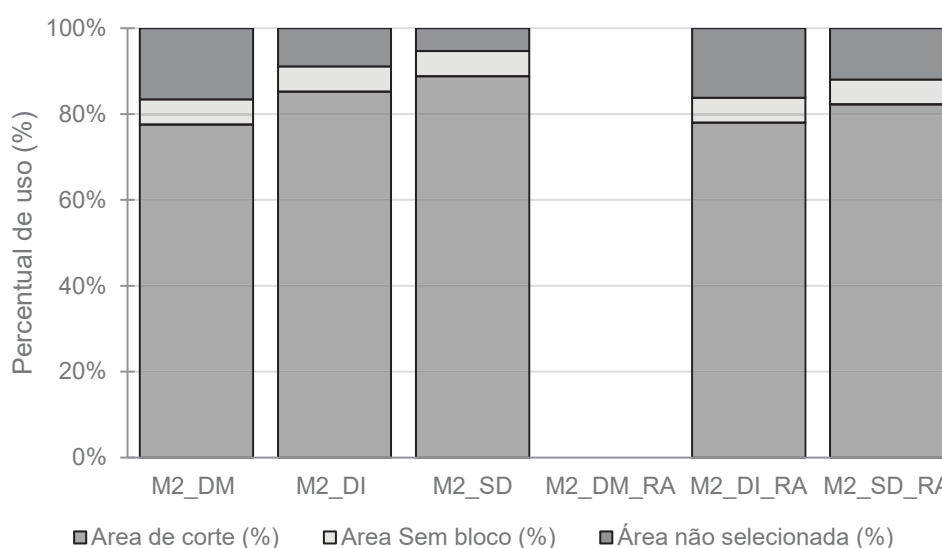
FONTE: O autor (2022).

Ainda, de acordo com a TABELA 3.2, observa-se que os cenários que utilizaram a restrição ambiental no Modelo 2 resultaram em menor retorno financeiro que quando comparado com os seus respectivos cenários que não utilizaram esta limitação. Da mesma forma, observa-se que quanto mais flexível a restrição de agregação maior o retorno financeiro, uma vez que esses valores estão diretamente relacionados à área agendada.

A FIGURA 3.2 apresenta um resumo percentual de designação de área planejada por cenário do Modelo 2, salvo o Cenário 5, cuja solução do problema foi infactível. No geral, observa-se que todos os cenários do Modelo 2 apresentaram 6% de área caracterizada como sem bloco. Esse percentual representa todos os talhões isolados ou que não conseguiram formar um conjunto de área mínima de corte, tornando-os incapazes de serem considerados no modelo matemático. No entanto, observando as demais áreas aptas a serem designadas no modelo matemático, observou-se, como esperado, que quanto mais flexível a restrição de agregação entre

os blocos, maior o percentual de área agendada para corte. Em contrapartida, quando os cenários são comparados em relação a inclusão ou não da restrição ambiental, houve redução no percentual de agendamento de área de corte nos cenários que utilizaram a restrição ambiental. Ou seja, quando comparados os cenários M2_DI com M2_DI_RA e cenários M2_SD com M2_SD_RA, observou-se uma redução de área agendada de 8 e 7%, respectivamente.

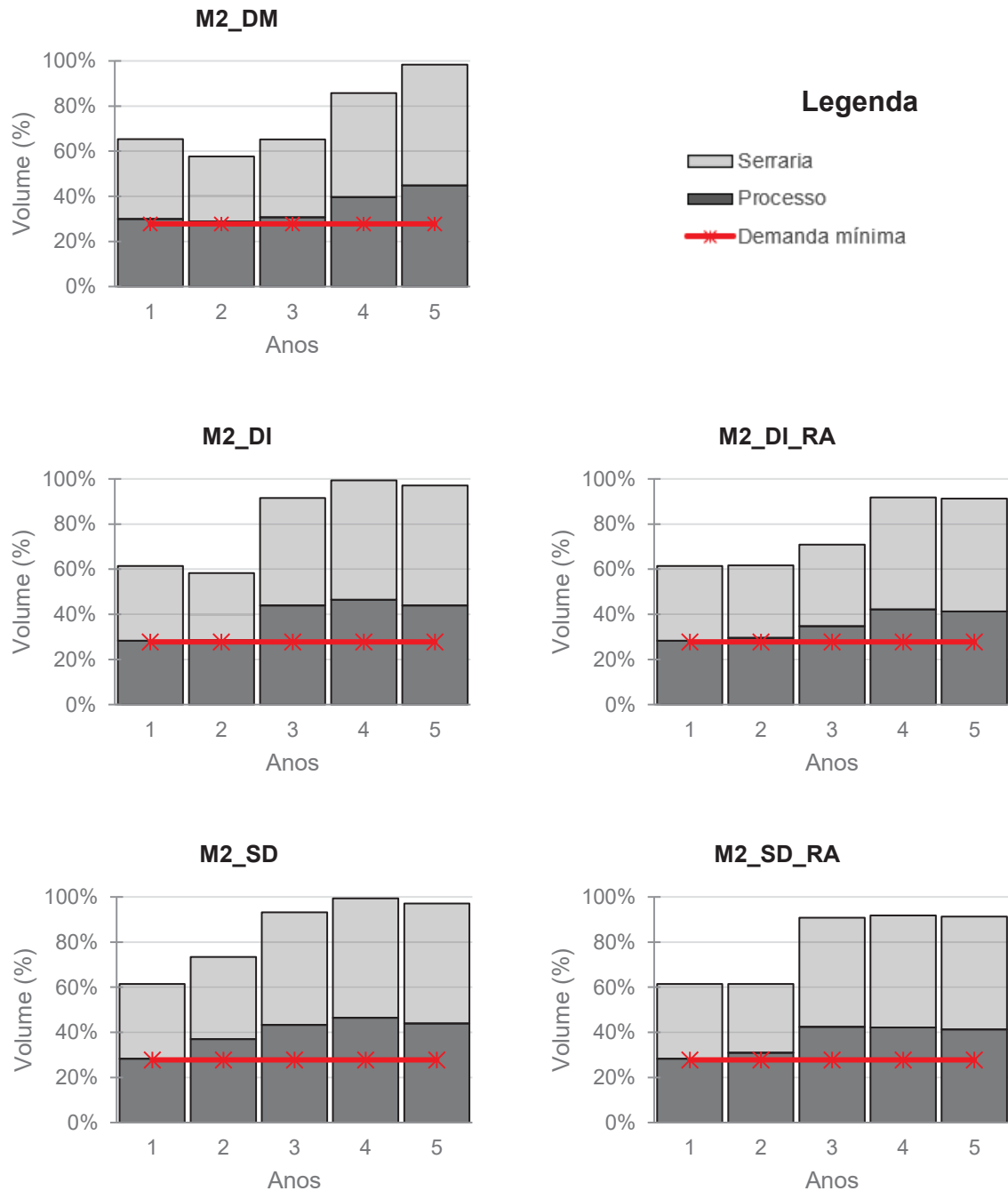
FIGURA 3.2 - RESUMO PERCENTUAL GERAL DE DESIGNAÇÃO DE ÁREA PLANEJADA POR CENÁRIO.



FONTE: O autor (2022).

Apesar da diferença de áreas agendadas entre os cenários factíveis, todos eles foram capazes de atender as restrições impostas pelo modelo, como por exemplo, satisfazer a produtividade mínima de madeira de processo ao longo do horizonte de planejamento (FIGURA 3.3). No entanto, observa-se que nos primeiros anos de planejamento os cenários agendaram, praticamente, o volume mínimo requerido para corte. Isso porque, apenas 30% da estrutura inicial da floresta era composta por floresta acima da idade mínima de corte (FIGURA 1.2), restringindo a seleção de mais áreas em função do atendimento das premissas impostas ao modelo. Em contrapartida, conforme mais unidades de áreas se tornavam aptas para corte ao longo do período de planejamento, houve acréscimo do volume agendado (FIGURA 3.3).

FIGURA 3.3 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DO VOLUME POR SORTIMENTO AGENDADO AO LONGO DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO PARA CADA CENÁRIO.

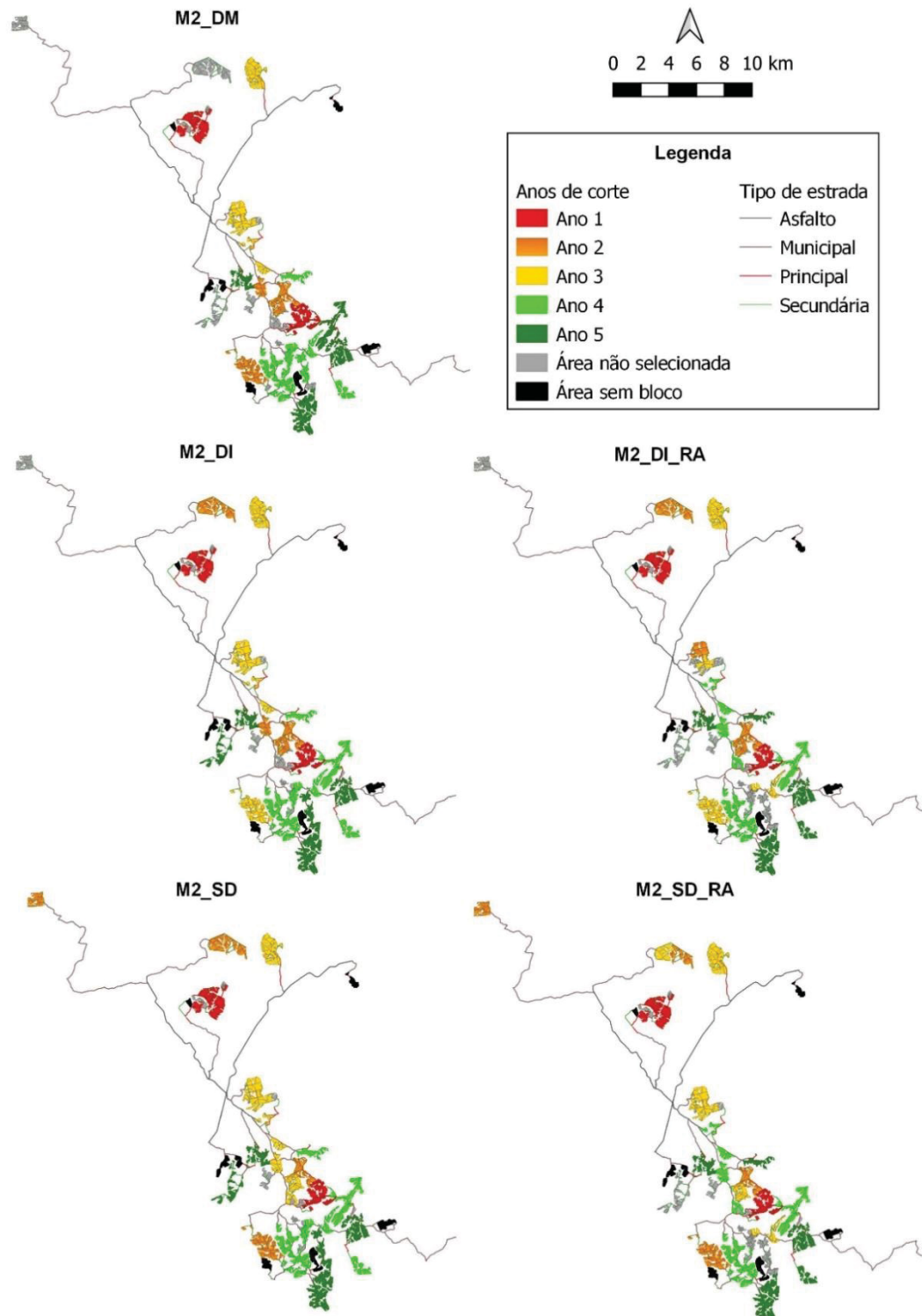


FONTE: O autor (2022).

A FIGURA 3.4 apresenta a alocação e distribuição espacial das áreas agendadas para corte de cada cenário. Percebeu-se que parte das áreas não agendadas para serem colhidas, não foram selecionadas devido não possuírem idade de corte quando os blocos adjacentes foram agendados. Ou seja, o modelo matemático definiu como melhor estratégia selecionar blocos adjacentes aptos para

corte e deixar as respectivas áreas ociosas. Sendo parte dessas áreas ociosas não mais aptas para formarem um bloco, dado que as áreas adjacentes já haviam sido agendadas.

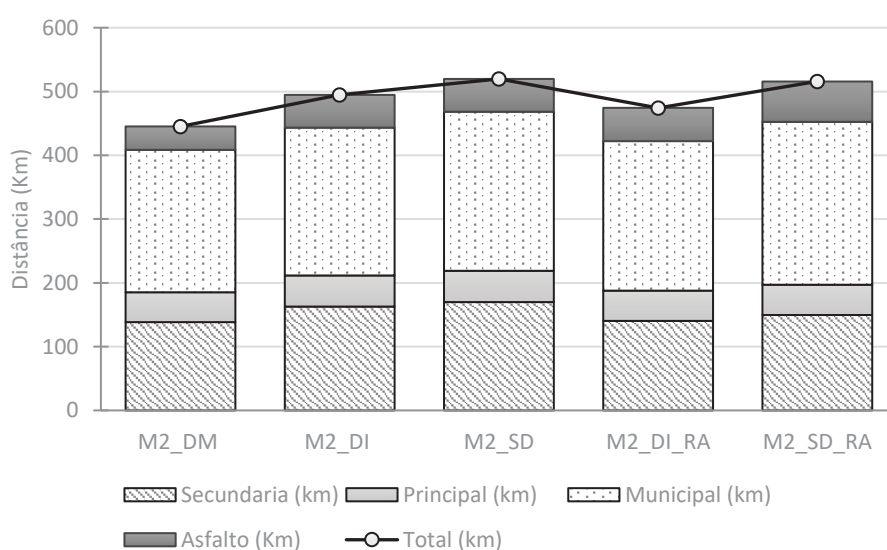
FIGURA 3.4 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS DE CORTE DE CADA CENÁRIO AO LONGO DO PERÍODO DE CINCO ANOS.



FONTE: O autor (2022).

Apesar dos cenários que utilizaram restrição ambiental terem agendado menor percentual de área de corte e, conseqüentemente, menor volume, observa-se na Figura 3.5 que houve pouca diferença na quantidade de estradas designadas entre os cenários equivalentes que não utilizaram a restrição ambiental. Comparando-se os cenários M2_DI com M2_DI_RA e M2_SD com M2_SD_RA, observa-se que os cenários que utilizaram a restrição ambiental designaram 4% e 1% a menos de quilometragem que os cenários que não utilizaram a respectiva restrição.

FIGURA 3.5 - DISTÂNCIA DE SEGMENTO E TIPO DE ESTRADAS DESIGNADAS POR CENÁRIO.



FONTE: O autor (2022).

3.4 DISCUSSÃO

Neste estudo foram formuladas diferentes prescrições de agregação de áreas de colheita florestal com o objetivo de investigar a aplicabilidade da metodologia apresentada e, analisar as consequências econômicas e ambientais geradas. De modo geral, a abordagem adotada foi capaz de gerar bons resultados quanto a espacialização das áreas de corte e em relação ao tempo de processamento computacional. Quando somado o tempo de processamento de formação dos blocos de colheita com o tempo de execução dos cenários pertencentes ao Modelo 2, obteve-se menos de 3h de processamento, resultando em um período aceitável de execução para um planejamento tático. Em contrapartida, o Modelo 1 demandou aproximadamente 4h de processamento total. Porém, como o principal objetivo da

aplicação desse modelo consistiu em apenas definir o parâmetro de distância mínima factível entre blocos para o Modelo 2 e não se caracterizou como essencial para a aplicação do Modelo 2, compreende-se como um tempo de processamento computacional admissível.

A metodologia proposta para a formação dos blocos de colheita, cuja definição de talhões vizinhos não se aplicou apenas a seus adjacentes, permitiu aumentar o número de combinações entre talhões capazes de atender as premissas de área mínima e máxima. Essa metodologia beneficiou principalmente a redução de talhões isolados e incapazes de atender a uma combinação de área mínima de bloco (60 ha), uma vez que a floresta de estudo é composta por unidades pequenas com área média de 4.2 ha. A incorporação da premissa de área mínima de bloco no planejamento florestal pode ser caracterizada como uma abordagem de mitigação dos impactos ambientais, uma vez que possibilita a criação de paisagens contínuas com maiores habitats interiores não perturbados (GUSTAFSON; CROW, 1994). Além disso, essa premissa pode permitir o abatimento dos custos relacionados ao deslocamento de uma equipe entre blocos de colheita. Isso porque, a definição da área mínima de bloco pode ser baseada a partir do volume de madeira produzido por unidades em idade de corte capazes de amortizar os custos de deslocamento entre blocos.

A apreciação de restrições que também minimizem a dispersão entre blocos de colheita consiste em outro fator importante a ser considerado em um planejamento, visando uma logística mais eficiente. Nesse estudo, após a aplicação das diferentes prescrições de agregação, os resultados apresentaram que quanto mais agregada a restrição de distância entre blocos, menor foi o percentual de área agendada para corte. Além disso, quanto menor a área de corte, resultou em menor retorno financeiro dos planos. Esses resultados estão relacionados a redução do espaço de busca de solução do problema, tornando os cenários menos flexíveis a atender as restrições as quais estão sujeitos. Além disso, essa formação está sujeita a perdas econômicas decorrentes da diminuição do valor de crescimento do ativo, que são definidos pela idade índice de sítio da floresta (BORGES; KANGAS; BERGSENG, 2017). No entanto, apesar da redução do retorno financeiro provocada pela agregação de blocos, outros benefícios monetários resultantes da aplicação dessa abordagem podem ser obtidos e que não foram considerados nesse estudo. Isto é, a agregação de unidades de corte pode beneficiar a performance de operações subsequentes e impactando na redução de custos de áreas como as de tratamentos silviculturais, transporte florestal

(AUGUSTYNCZIK; ARCE; SILVA, 2016), transporte das máquinas de colheita e custos administrativos (HEINONEN et al., 2018).

Além das restrições de agregação, foram implementados nesse estudo restrições ambientais que impedem o corte de blocos adjacentes a fim de conciliar abordagens econômicas e que minimizem os impactos provindos da operação. Os resultados mostraram que os cenários cuja restrição ambiental foi aplicada resultaram em menos área agendada que os cenários que não consideraram essa mesma restrição. Isso porque, esses cenários tornaram-se muito mais restritos, limitando as possibilidades para satisfazer as restrições impostas impactando no retorno econômico e mais áreas ociosas. Apesar desses cenários terem resultado em maior percentual de área ociosa, apresentaram quase a mesma quantidade de estradas agendadas que os cenários que não utilizaram, uma vez que a restrição ambiental tende a dispersar os blocos de colheita.

Quando restrições espaciais são aplicadas em planejamento de colheita, como por exemplo, o uso de restrições de corte ou formação de blocos, espera-se a redução na rentabilidade dos planos (por exemplo, Öhman e Eriksson (2010), McDill, Rebain e Braze (2002), Augustynczik, Arce e Silva, (2016)). Porém, apesar da respectiva tendência, busca-se que a grande maioria da área planejada seja designada para corte, o que não foi alcançado em alguns cenários devido ao alto nível de restrição aos quais estavam sujeitos. Dessa maneira, propõe-se para trabalhos futuros a flexibilização do modelo matemático a fim de melhorar os resultados dos respectivos cenários. Uma das sugestões consiste em remover as restrições de idade mínima e máxima do modelo matemático e incluir uma restrição que garanta que os blocos selecionados atendam uma idade média de corte. Com isso, espera-se que blocos não deixem de ser selecionados caso possuam alguns poucos talhões com idade não comercial. Outra alternativa, consiste em penalizar o modelo matemático caso esse selecione áreas com idades não esperadas para corte.

3.5 CONCLUSÃO

O planejamento com padrão espacial mais adequado varia conforme o objetivo do gestor. No entanto, buscou-se neste estudo gerar uma gama de planos que permitem a análise de sensibilidade quanto à abordagem de blocos de colheita, bem

como o agrupamento das áreas de corte sujeitas às restrições ambientais e de abastecimento.

A metodologia proposta para a formação dos blocos de colheita, que definiu como talhões vizinhos não apenas a seus adjacentes diretos, foi capaz de aumentar o número de combinações entre talhões capazes de atender as premissas de áreas mínima e máxima. Essa abordagem foi capaz de reduzir a quantidade de talhões isolados e incapazes de atender a uma combinação de área mínima de bloco (60 ha), uma vez que a floresta de estudo é composta por unidades pequenas com área média de 4,2 ha.

Os cenários implementados foram capazes de conciliar o uso de restrições de agregação com restrições ambientais. No entanto, quanto mais agregada a distância entre blocos e incorporada a restrição ambiental, menos flexível se torna o modelo matemático, tendendo a redução de áreas agendadas e menor retorno econômico. Apesar da redução da rentabilidade, outros benefícios monetários resultantes da aplicação dessa abordagem podem ser obtidos em operações subsequente que não foram considerados nesse estudo. Além do mais, melhorias nos modelos apresentados podem ser implementadas, como a flexibilização das restrições de idade, de maneira que o modelo matemático seja capaz de ampliar as alternativas de seleção de áreas de corte.

3.6 REFERÊNCIAS

AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming. **Journal of Forest Economics**, v. 24, p. 72–81, 2016.

AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Implementing minimum area harvesting blocks in an optimized forest planning model. **Revista Árvore**, v. 41, n. 1, p. e410118, 2017.

BELAVENUTTI, P.; ROMERO, C.; DIAZ-BALTEIRO, L. Integrating strategic and tactical forest-management models within a multicriteria context. **Forest Science**, v. 65, n. 2, p. 178–188, 2019.

BELLAVENUTTE, P.; CHUNG, W.; DIAZ-BALTEIRO, L. Partitioning and solving large-scale tactical harvest scheduling problems for industrial plantation forests. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, p. 811–818, 2020.

BETTINGER, P.; BOSTON, K. Forest planning heuristics-current recommendations and research opportunities for s-metaheuristics. **Forests**, v. 8, n. 12, p. 1–10, 2017.

BORGES, J. G. et al. Strategic management scheduling. In: BORGES, J. G. et al. (Eds.). . **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 171–238.

BORGES, P. et al. Impact of maximum opening area constraints on profitability and biomass availability in forestry – a large, real world case. **Silva Fennica**, v. 49, n. 5, p. 1–21, 2015.

BORGES, P.; KANGAS, A.; BERGSENG, E. Optimal harvest cluster size with increasing opening costs for harvest sites. **Forest Policy and Economics**, v. 75, p. 49–57, 2017.

D'AMOURS, S.; EPSTEIN, R.; RONNQVIST, M. Operations research in forestry and forest products industry. **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**, 2011.

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**, v. 356, p. 124–135, 2015.

DONG, L. et al. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. **Silva Fennica**, v. 52, n. 1, 2018.

FERRARI, L. S.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L. AgendamentoTatico otimizado da colheita florestal.pdf. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 167–176, 2019.

GHARBI, C.; RÖNNQVIST, M.; CARLE, M.-A. A new mixed-integer programming model for spatial forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, p. 1493–1503, 2019.

GUSTAFSON, E. J.; CROW, T. R. Modeling the effects of forest harvesting on landscape structure and the spatial distribution of cowbird brood parasitism. **Landscape Ecology**, v. 9, n. 4, p. 237–248, 1994.

HEINONEN, T. et al. Aggregating microsegments into harvest blocks by using spatial optimization and proximity objectives. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 1184–1193, 2018.

KIRBY, M. W.; HAGER, W. A.; WONG, P. Simultaneous planning of wildland management and transportation alternatives. **TIMS Studies in the Management Sciences**, v. 21, p. 371–387, 1986.

KURTTILA, M. The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning - A landscape ecological perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 142, n. 1–3, p. 129–142, 2001.

MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G. et al. (Eds.). . **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 27–59.

MCDILL, M. E. et al. Comparing Model I and Model II Formulations of Spatially Explicit Harvest Scheduling Models with Maximum Area Restrictions. **Forest Science**, v. 62, n. 1, p. 28–37, 2016.

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

MOBTAKER, A. et al. Minimizing spatial dispersion of forest harvest areas using spectral clustering and set covering modelling. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 1563–1576, 2018.

MOBTAKER, A. et al. Integrated forest harvest planning and road-building model with consideration of economies of scale. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, p. 989–1001, 2020.

MURRAY, A. T. Spatial restriction in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 45, n. 1, p. 45–52, 1999.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, p. 77–89, 2010.

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

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

TÓTH, S. F. et al. A strengthening procedure for the path formulation of the area-based adjacency problem in harvest scheduling models. **Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences**, v. 4, n. 1, p. 24–49, 2012.

4 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

A definição de um planejamento com padrão espacial mais adequado varia em concordância com o objetivo do gestor. No entanto, buscou-se neste estudo gerar uma gama de planos que permite uma análise de sensibilidade quanto à maximização do retorno econômico, considerando abordagens de blocos de colheita, restrições de abastecimento, restrições ambientais e de agrupamento das áreas de corte.

A metodologia aplicada para a formação dos blocos se caracterizou como flexível para ser implementada em diferentes realidades de manejo florestal. Dado que essa metodologia possibilita a seleção de diferentes combinações e tamanhos de blocos, permite que o tomador de decisão as ajuste às suas necessidades ou leis locais. Além do mais, essa abordagem foi capaz de reduzir a quantidade de talhões isolados e incapazes de atender a uma combinação de área mínima de bloco de 60 ha, uma vez que a floresta de estudo é composta por unidades pequenas, com área média de 4,2 ha. Adicionalmente, a partir da aplicação do algoritmo de *Girvan-Newman* para a formação dos blocos de colheita, possibilitou-se resolver problemas de planejamento tático de colheita e transporte, integrando preocupações econômicas e ambientais, dentro de um tempo de processamento aceitável.

Além do mais, tendo em vista a garantia da sustentabilidade ambiental e econômica do negócio, destaca-se a relevância do uso conjunto das premissas de áreas mínima e máxima de blocos de colheita e restrição de adjacência. Isso porque, a aplicação da restrição de área mínima de bloco possibilita que o volume cortado provindo de uma área mínima garanta a cobertura mínima de custos de corte e deslocamento até a área de corte. Além do mais, a aplicação dessa premissa auxilia na minimização dos impactos negativos gerados no interior de pequenos fragmentos. Por outro lado, a restrição de área máxima de corte e as restrições adjacentes limitam a formação de grandes áreas abertas e auxiliam na minimização dos impactos ambientais. No entanto, essas restrições ambientais acentuam as limitações de resolução do modelo matemático.

De modo geral, os resultados apresentaram que, quanto mais abrangente a definição de vizinhança para a formação dos blocos, maior será o retorno econômico (VPL), a quantidade de área de corte disponível para seleção do modelo e o tamanho médio dos blocos, bem como menor será o número de talhões isolados e o custo de manutenção de estradas. Além do mais, os cenários cujas restrições de agregação e

ambiental foram capazes de serem resolvidas em um mesmo problema. No entanto, quanto mais agregada a distância entre blocos e incorporada a restrição ambiental, menos flexível se torna o modelo matemático, tendendo a redução de áreas agendadas e menor retorno econômico. Apesar da redução da rentabilidade, outros benefícios monetários resultantes da aplicação dessa abordagem podem ser obtidos em operações subsequente não consideradas neste estudo. Além do mais, melhorias nos modelos apresentados podem ser feitas, como a flexibilização das restrições de idade, de maneira que o modelo matemático seja capaz de ampliar as alternativas de seleção de áreas de corte.

REFERÊNCIAS GERAIS

- ANDALAFT, N. et al. A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation. **Operational Research**, v. 51, n. 4, p. 613–628, 2003.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming. **Journal of Forest Economics**, v. 24, p. 72–81, 2016.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. et al. Promoting harvesting stands connectivity and its economic implications in Brazilian forest plantations applying integer linear programming and simulated annealing. **Forest Policy and Economics**, v. 73, p. 120–129, 2016.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. Habitat amount and connectivity in forest planning models: Consequences for profitability and compensation schemes. **Journal of Environmental Management**, v. 283, n. 2021, p. 111982, 2021.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming. **Journal of Forest Economics**, v. 24, p. 72–81, 2016.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Implementing minimum area harvesting blocks in an optimized forest planning model. **Revista Árvore**, v. 41, n. 1, p. e410118, 2017.
- BANHARA, J. R. et al. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais , espaciais e climáticas. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 85, p. 85–95, 2010.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2–4, p. 145–173, 2005.
- BELAVENUTTI, P.; ROMERO, C.; DIAZ-BALTEIRO, L. Integrating strategic and tactical forest-management models within a multicriteria context. **Forest Science**, v. 65, n. 2, p. 178–188, 2019.
- BELAVENUTTE, P.; CHUNG, W.; DIAZ-BALTEIRO, L. Partitioning and solving large-scale tactical harvest scheduling problems for industrial plantation forests. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, p. 811–818, 2020.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K. Forest planning heuristics-current recommendations and research opportunities for s-metaheuristics. **Forests**, v. 8, n. 12, p. 1–10, 2017.
- BORGES, J. G. et al. Strategic management scheduling. In: BORGES, J. G. et al. (Eds.). . **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 171–238.

BORGES, J. G.; HOGANSON, H. M.; ROSE, D. W. Combining a decomposition strategy with dynamic programming to solve spatially constrained forest management scheduling problems. **Forest Science**, v. 45, n. 2, p. 201–212, 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**, v. 233, n. 3, p. 700–710, 2014

BORGES, P. et al. Impact of maximum opening area constraints on profitability and biomass availability in forestry – a large, real world case. **Silva Fennica**, v. 49, n. 5, p. 1–21, 2015.

BORGES, P.; KANGAS, A.; BERGSENG, E. Optimal harvest cluster size with increasing opening costs for harvest sites. **Forest Policy and Economics**, v. 75, p. 49–57, 2017.

BRANDES, U. A faster algorithm for betweenness centrality. **Journal of mathematical sociology**, v. 25, n. 2, p. 163–177, 2001.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource managment**. San Diego, CA: Elsevier Science, 2003.

CARVAJAL, R. et al. Imposing connectivity constraints in forest planning models imposing connectivity constraints in forest planning models. **Operational Research**, v. 61, n. 4, p. 824–836, 2013.

CHUNG, W. et al. **User ' s guide to SNAP for ArcGIS ®: ArcGIS interface for scheduling and network analysis program** U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Portland. Disponível em: <<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/39933>>.

COSTA, S. **Algoritmo de Girvan & Newman aplicado à formação de blocos de colheita - Planejamento Florestal Otimizado utilizando o R**. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/algoritmo-de-girvan-newman-aplicado-à-formação-blocos-sérgio-costa?articleId=6646037556158877696>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

D'AMOURS, S.; EPSTEIN, R.; RONNQVIST, M. Operations research in forestry and forest products industry. **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**, 2011.

DEHMER, M.; BASAK, S. C. **Statistical and machine learning approaches for network analysis**. Wiley, 2012.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 271, p. 269–271, 1959.

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**, v. 356, p. 124–135, 2015.

DONG, L. et al. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. **Silva Fennica**, v. 52, n. 1, 2018.

FERRARI, L. S.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L. Agendamento Tático otimizado da colheita florestal.pdf. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 167–176, 2019.

FORTUNATO, S. Community detection in graphs. **Physics Reports**, v. 486, n. 3–5, p. 75–174, 2010.

GHARBI, C.; RÖNNQVIST, M.; CARLE, M.-A. A new mixed-integer programming model for spatial forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, p. 1493–1503, 2019.

GIRVAN, M.; NEWMAN, M. E. J. Community structure in social and biological networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 99, n. 12, p. 7821–7826, 2002.

GOYCOOLEA, M. et al. Evaluating Approaches for Solving the Area Restriction Model in Harvest Scheduling. **Forest Science**, v. 55, n. 2, p. 149–165, 2009.

GUIGNARD, M.; RYU, C.; SPIELBERG, K. Model tightening for integrated timber harvest and transportation planning. **European Journal of Operational Research**, v. 111, n. 3, p. 448–460, 1998.

GUSTAFSON, E. J.; CROW, T. R. Modeling the effects of forest harvesting on landscape structure and the spatial distribution of cowbird brood parasitism. **Landscape Ecology**, v. 9, n. 4, p. 237–248, 1994.

GUSTAFSSON, L. et al. Retention forestry to maintain multifunctional forests: A world perspective. **BioScience**, v. 62, n. 7, p. 633–645, 2012.

HEINONEN, T. et al. Aggregating microsegments into harvest blocks by using spatial optimization and proximity objectives. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 1184–1193, 2018.

JIAO, Z. et al. Module dividing for brain functional networks by employing betweenness efficiency. **Multimedia Tools and Applications**, v. 79, n. 21–22, p. 15253–15271, 2020.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives — discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 18, p. 1–30, 1977.

KIRBY, M. W.; HAGER, W. A.; WONG, P. Simultaneous planning of wildland management and transportation alternatives. **TIMS Studies in the Management Sciences**, v. 21, p. 371–387, 1986.

KURTTILA, M. The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning - A landscape ecological perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 142, n. 1–3, p. 129–142, 2001.

MCDILL, M. E. **Forest resource management** Pennsylvania State University, , 1999. Disponível em: <https://faculty.washington.edu/toths/ESRM461/Textbook/Ch12_HarvSc.PDF>

MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G. et al. (Eds.). **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 27–59.

MCDILL, M. E. et al. Comparing Model I and Model II Formulations of Spatially Explicit Harvest Scheduling Models with Maximum Area Restrictions. **Forest Science**, v. 62, n. 1, p. 28–37, 2016.

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

MOBTAKER, A. et al. Minimizing spatial dispersion of forest harvest areas using spectral clustering and set covering modelling. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, p. 1563–1576, 2018.

MOBTAKER, A. et al. Integrated forest harvest planning and road-building model with consideration of economies of scale. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, p. 989–1001, 2020.

MURRAY, A. T. Spatial restriction in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 45, n. 1, p. 45–52, 1999.

MYLAVARAPU, S. P.; GOVINDARAJAN, S. IDK my friends: Link analysis on social networks to mine surprise connections. In: BALUSAMY, S. et al. (Eds.). **Computational intelligence, cyber security and computational models. Models and Techniques for Intelligent Systems and Automation**. ICC3 2019 ed. Singapore: Springer, 2020. v. 1213p. 29–35.

NADERIALIZADEH, N.; CROWE, K. A.; ROUHAFZA, M. Solving the integrated forest harvest scheduling model using metaheuristic algorithms. **Operational Research**, 2020.

NEWMAN, M. E. J. Analysis of weighted networks. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 70, n. 5, p. 9, 2004a.

NEWMAN, M. E. J. Fast algorithm for detecting community structure in networks. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 69, n. 6, p. 5, 2004b.

NEWMAN, M. E. J. Modularity and community structure in networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 23, p. 8577–8582, 2006.

NEWMAN, M. E. J.; GIRVAN, M. Finding and evaluating community structure in networks. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 69, n. 2, p. 1–16, 2004.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, p. 77–89, 2010.

OLIVEIRA, M. D. B. DE. **On business analytics : Dynamic network analysis for descriptive analytics and multicriteria decision analysis for prescriptive analytics**. Universidade do Porto, 2015.

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

RONNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical Programming**, v. 97, p. 267–284, 2003.

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

ROSS, K. L.; TÓTH, S. F. A model for managing edge effects in harvest scheduling using spatial optimization. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 7, p. 646–654, 2016.

ROSS, K. L.; TÓTH, S. F.; JAROSS, W. S. Forest harvest scheduling with endogenous road costs. **Interfaces**, v. 48, n. 3, p. 1–11, 2018.

SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, G. Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimised harvest scheduling. **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 5, p. 651–657, 2012.

TÓTH, S. F. et al. A strengthening procedure for the path formulation of the area-based adjacency problem in harvest scheduling models. **Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences**, v. 4, n. 1, p. 24–49, 2012.

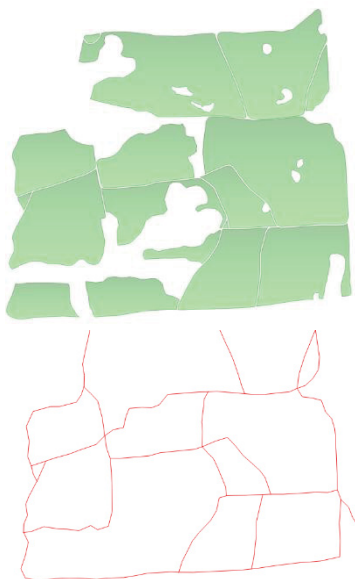
WOLSEY, L. A. **Integer Programming**. New York. 1998.

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P. Focal-point aggregation under area restrictions through spatially constrained optimal harvest scheduling. **Forest Science**, v. 65, n. 2, p. 164–177, 2019.

APÊNDICE 1 – FORMAÇÃO DA REDE DE ESTRADAS

Com base no *software* QGIS e de dados geoespaciais (*shapefile*) dos talhões e estradas florestais, o grafo inicial de estradas foi fundamentado conforme apresentado nos tópicos a seguir.

1.0. Base de dados



A base de dados foi fundamentada em dois arquivos *shapefiles*:

Arquivo 1: *Shapefile* do tipo polígono que representa os talhões florestais

Nome do arquivo: 1.0.Talhoes

Arquivo 2: *Shapefile* do tipo linha que caracteriza as estradas e distâncias

Nome do arquivo: 2.0.Estradas

2.0. Gerar centroides



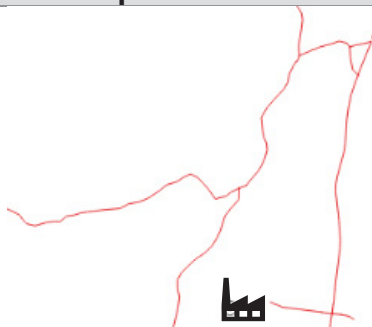
Foram gerados centroides para todos os talhões (polígonos) da base de dados.

Shapefile base: 1.0.Talhoes

Caminho QGIS: Vector > Geometry tools > Centroids

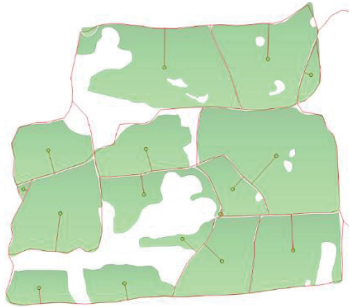
Nome arquivo saída: 1.1.Centroide

3.0. Gerar ponto de demanda (ponto fábrica)



Foi criado um *shapefile* do tipo ponto tendo em vista identificar o local onde a madeira será escoada. No caso do presente estudo, foi criado um único ponto como destino final (fábrica).

4.0. Acessibilidade à cada talhão florestal



A acessibilidade de cada talhão florestal foi padronizada a partir da conexão de cada centroide à respectiva estrada mais próxima, utilizando-se a ferramenta *Connect nodes to line*. Essa ferramenta cria um novo segmento de estrada no *shapefile* de estradas, além de que ela secciona a linha da estrada onde o novo segmento criado intersecta, conforme pode ser visto na imagem à esquerda.

Shapefile base: 1.1.Centroide
2.0.Estradas

Caminho QGIS:

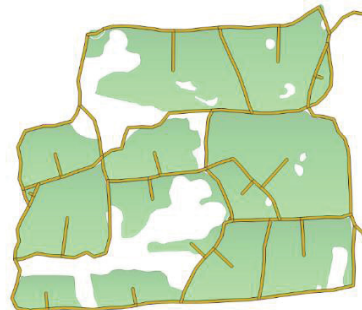
-Pluggin > Manage and install plugins > Network > Install

-Processing > Toolbox > Networks > Network > Connect nodes to line

Nome do arquivo saída: 2.1.Estradas

5.0. Formação inicial do grafo de estradas

5.1. Buffer das estradas



Shapefile base: 2.1.Estradas

Caminho QGIS: Vector > Geoprocessing tools > Buffer (5m)

Nome do arquivo saída:
2.2.Estradas_ArestaBuffer

5.1.1. Buffer das estradas – Ordenamento estradas

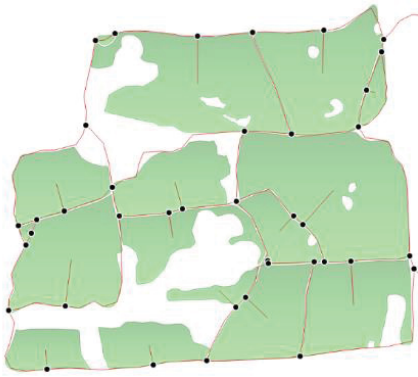
OBJECTID_1	TIPO_ESTRA	Dist	OrdemLinha
76	62582 MUNICIPAL	31.695	76
77	62584 MUNICIPAL	514.304	77
78	62586 SECUNDARIA	680.203	78
79	62593 SECUNDARIA	246.504	79
80	62594 SECUNDARIA	84.530	80

Depois de feito o buffer das estradas, adicionar uma coluna na tabela de atributos com o nome "OrdemLinha" e enumerar sequencialmente todas as linhas remanescentes.

Caminho QGIS: Tabela de atributos > Toggle editing mode (Ctrl+E) > Open field calculator (Ctrl+L) > Create a new field > Output field name: "OrdemLinha" > Output field type: Whole number (integer) > Expression: @row_number

Nome do arquivo saída:
2.2.Estradas_ArestaBuffer

5.2. Formação dos vértices das estradas



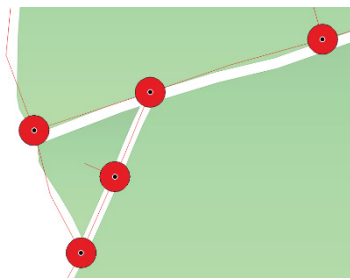
A criação dos vértices ao longo das estradas teve como objetivo permitir que todos os segmentos de estrada fossem ligados. Isso porque, a modelagem matemática das variáveis estradas foram baseadas em pontos. Além disso, o modelo também utiliza como base os pontos para representar os talhões e a fábrica onde a madeira será escoada.

Shapefile base: 2.1.Estradas

Caminho QGIS: Processing > toolbox > vector overlay > line intersection (shapes: 2.1.Estradas x 2.1.Estradas)

Nome arquivo: 2.2.0.VerticesEstradas

5.2.1. Buffer dos vértices das estradas



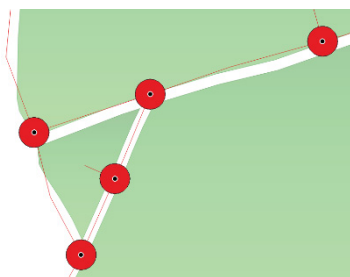
A realização do buffer dos vértices das estradas teve como objetivo rastrear quais pontos intersectam em cada segmento de estrada.

Shapefile base: 2.2.0.Estradas_ArestaBuffer

Caminho QGIS: Vector > Geoprocessing tools > buffer (Ex: 5m)

Nome do arquivo:
2.2.1.VerticesEstradas_Buffer5m

5.2.2. Remover vértices duplicados



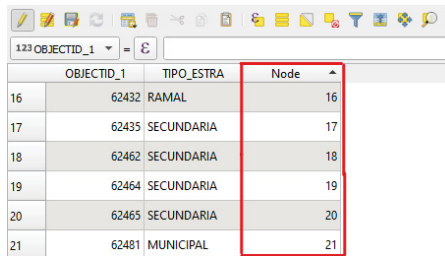
Quando gerado os vértices das estradas na etapa 5.2 o QGIS mantém na tabela de atributos todas informações de cruzamento de linhas, gerando vértices duplicados. Como o objetivo deste trabalho é lidar com apenas um nó a cada intersecção de linhas, os vértices duplicados foram removidos.

Shapefile base: 2.2.1.VerticesEstradas_Buffer5m

Caminho QGIS: Processing > Toolbox > Vector General > Delete Duplicates

Nome do arquivo:
2.2.2.VerticesEstradas_Buffer5m_Cleaned

5.2.2.1. Enumerar linhas tabela de atributos



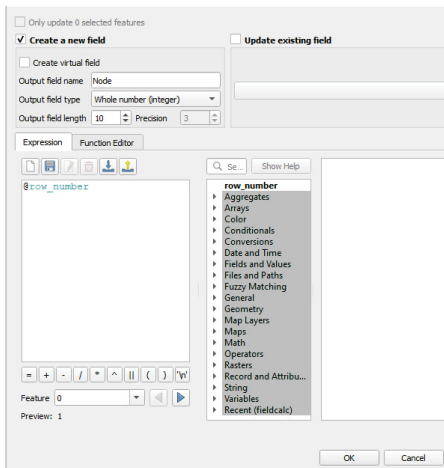
OBJECTID_1	TIPO_ESTRADA	Node	
16	62432	RAMAL	16
17	62435	SECUNDARIA	17
18	62462	SECUNDARIA	18
19	62464	SECUNDARIA	19
20	62465	SECUNDARIA	20
21	62481	MUNICIPAL	21

Depois de removidos os pontos duplicados, adicionar uma coluna na tabela de atributos com o nome “Node” e enumerar sequencialmente todas as linhas remanescentes.

Nome do arquivo:

2.2.2.VerticesEstradas_Buffer5m_Cleaned

5.2.1.1.1. Enumerar linhas – Opção 1

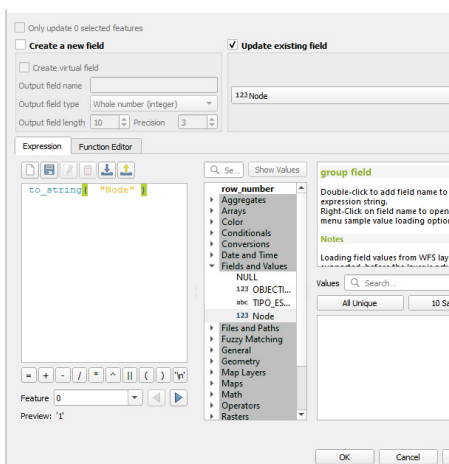


Caminho QGIS: Tabela de atributos > Toggle editing mode (Ctrl+E) > Open field calculator (Ctrl+L) > Create a new field > Output field name: “Node” > Output field type: Whole number (integer) > Expression: @row_number

Nome do arquivo:

2.2.2.VerticesEstradas_Buffer5m_Cleaned

5.2.1.1.2. Enumerar linhas – Opção 2



Caso a “Opção 1” resulte em erro, deve-se ajustar o formato dos valores da coluna “Node” de “Whole number” para “String”.

Tabela de atributos > Toggle editing mode (Ctrl+E) > Open field calculator (Ctrl+L) > Update existing field: “Node” > Expression: to_string(“Node”)

Nome do arquivo:

2.2.2.VerticesEstradas_Buffer5m_Cleaned

5.2.3. Intersecção de shapefiles linhas e pontos das estradas



Nessa etapa é realizada a intersecção dos arquivos 2.2.Estradas_ArestaBuffer (subitem 5.1) e 2.2.2.VerticesEstradas_Buffer5m_Cleaned (subitem 5.2.2.1), tendo como objetivo conhecer quais pontos compõem cada segmento de estrada e a distância de cada segmento.

Caminho QGIS: Processing > Toolbox > Vector overlay > Intersection > Input layer: “2.2.Estradas_ArestaBuffer”, Overlay layer: “2.2.2.VerticesEstradas_Buffer5m_Cleaned”

Nome do arquivo: 3.0.IntersecaoEstrada_E_No

5.2.3.1. Exportar tabela de atributos

 Captura de tela da tabela de atributos do QGIS. A tabela mostra as seguintes colunas: OBJECTO_1, TIPO_ESTRADA, OBJECTO_2, TIPO_EST_1, Vertice, OrdemLinha, Distancia, e Tipo. Os dados são organizados em linhas numeradas de 19 a 24.

OBJECTO_1	TIPO_ESTRADA	OBJECTO_2	TIPO_EST_1	Vertice	OrdemLinha	Distancia	Tipo
62501	MUNICIPAL	62576	MUNICIPAL	35	19	510.59	1
62501	MUNICIPAL	62582	MUNICIPAL	36	20	510.59	2
62502	MUNICIPAL	62582	MUNICIPAL	36	21	31.695	3
62502	MUNICIPAL	62582	MUNICIPAL	37	22	31.695	4
62504	MUNICIPAL	62584	MUNICIPAL	38	23	514.306	5
62504	MUNICIPAL	62584	MUNICIPAL	39	24	514.306	6

Após a intersecção dos shapes, na tabela de atributos haverá informações com o nome de cada Segmento (“OrdemLinha”), distância de cada segmento, tipo de estrada e o número de cada vértice (“Node”). Essas informações já criam o grafo de arestas e pontos das estradas, porém precisam ser organizadas conforme apresentadas no item a seguir. Porém, antes disso, a tabela de atributos deve ser exportada.

Caminho QGIS: Clicar em cima do layer “3.0. IntersecaoEstrada_E_No” > Export > Save feature as > Format: Comma separated value [CSV] > File name: (procurer o local onde salvar)

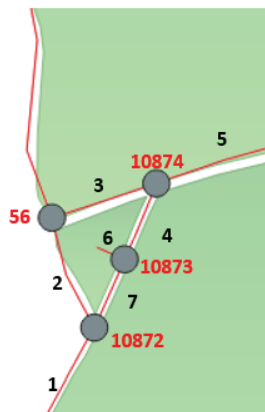
Nome do arquivo: 3.1. GrafoEstradas.csv

5.2.3.2. Organização prévia do grafo estradas

Após a intersecção dos shapes, na tabela de atributos haverá informações com o nome de cada Segmento (“OrdemLinha”), Distância de cada segmento, e o número de cada vértice (“Node”). Essas informações já criam o grafo de arestas e pontos das estradas, porém precisam ser organizadas. Dessa maneira, a tabela de atributos deve ser exportada e na sequência organizada conforme exemplo abaixo.

Caminho QGIS: Clicar em cima do layer “3.0. IntersecaoEstrada_E_No” > Export > Save feature as > Format: Comma separated value [CSV] > File name: (procurer o local onde salvar)

Nome do arquivo: 3.1. GrafoEstradas.csv

EXEMPLO

(Vértice 1, Vértice 2) = Distância real
 (56, 10874) = 56,85
 (56, 10872) = 61,38

(10874, 10873) = 80,56

(Vértice 1, Vértice 2) = Tipo estrada
 (56, 10874) = SECUNDARIA
 (56, 10872) = SECUNDARIA

(10874, 10873) = MUNICIPAL

OBJECTID_1	OBJECTID	TIPO_ESTRA	DIST (m)	OrdemLinha	OBJECTID_2	OBJECTID_3	TIPO_EST_1	VertEst
62658	8747398	SECUNDARIA	203,79	1	62662	8747393	SECUNDARIA	10829
62658	8747398	SECUNDARIA	203,79	1	62661	8747400	SECUNDARIA	10872
62659	8747399	SECUNDARIA	61,38	2	62660	8747396	SECUNDARIA	56
62659	8747399	SECUNDARIA	61,38	2	62661	8747400	SECUNDARIA	10872
62660	8747396	SECUNDARIA	56,85	3	62660	8747396	SECUNDARIA	56
62660	8747396	SECUNDARIA	56,85	3	62661	8747400	SECUNDARIA	10874
128002	1532226	MUNICIPAL	80,56	4	127987	1532246	MUNICIPAL	1117
128002	1532226	MUNICIPAL	80,56	4	128040	1532227	MUNICIPAL	1139
62666	8747401	SECUNDARIA	83,87	5	62666	8747401	SECUNDARIA	10831
62666	8747401	SECUNDARIA	83,87	5	62661	8747400	SECUNDARIA	10874
62661	8747400	SECUNDARIA	15,25	6	62661	8747400	SECUNDARIA	10873
62661	8747400	SECUNDARIA	38,67	7	62661	8747400	SECUNDARIA	10872
62661	8747400	SECUNDARIA	38,67	7	62661	8747400	SECUNDARIA	10873

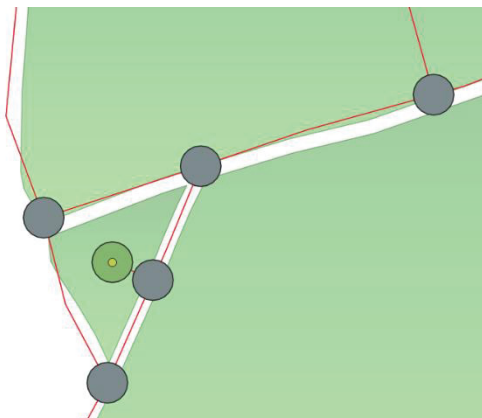
Vértices: 56, 10872, 10873, 10874

Vértice	OrdemLinha	OrdemLinha	Vértice	Distância (m)	Tipo Estrada
56	3	3	10874	56,85	SECUNDARIA
56	2	2	10872	61,38	SECUNDARIA
10872	2	2	56	61,38	SECUNDARIA
10872	1	-	-	-	-
10872	7	7	10873	38,67	SECUNDARIA
10873	7	7	10872	38,67	SECUNDARIA
10873	6	-	-	-	-
10873	4	4	10874	56,85	MUNICIPAL
10874	3	3	56	56,85	SECUNDARIA
10874	4	4	10873	80,56	MUNICIPAL
10874	5	-	-	-	-

Nessa etapa são identificados todos os segmentos de estradas. No entanto, destaca-se que no modelo matemático utilizou-se arcos direcionados entre cada talhão até a fábrica, os quais foram traduzidos *a posteriori* desta etapa em ambiente *Python*. A partir do respectivo tratamento é formado o conjunto *Y* apresentado no modelo matemático.

6.0. Identificar conjunto de estradas de acesso para cada talhão

6.1. Buffer centroides



Após criados os centroides de cada polígono, conforme apresentado no item 2.0. *Gerar centroides*, fazer o buffer dos respectivos pontos.

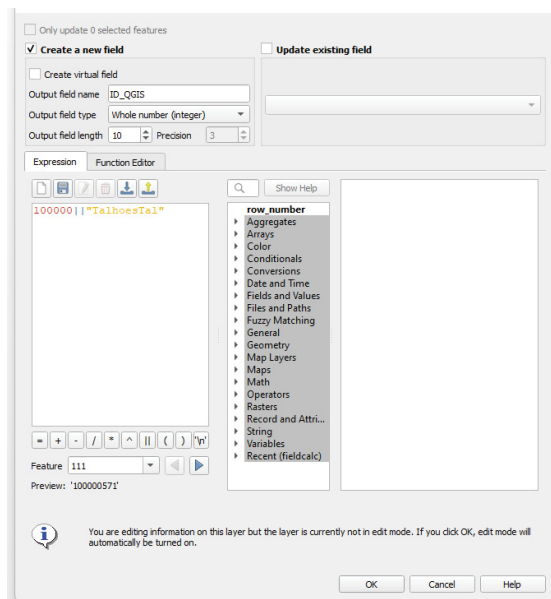
Shapefile base: 1.1.Centroide

Caminho QGIS: Vector > Geoprocessing tools > buffer (Ex: 5m)

Nome arquivo saída:

1.2.Centroide_Buffer

6.1.1. Identificação talhões



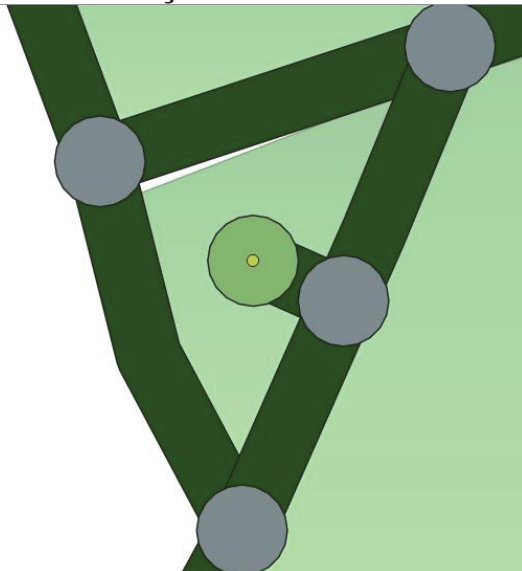
	OBJECTID	DadosIdade	TalhoesTal	ID_QGIS
1	2034	11	1	1000001
2	1256	13	10	10000010
3	4048	12	100	100000100
4	5416	12	101	100000101

Como a identificação dos talhões é puramente numérica foram concatenados a cada valor de talhão o número “100.000”, tendo em vista diferenciar os valores numéricos dos vértices das estradas. Para isso, na tabela de atributos foi adicionada uma nova coluna com o nome “ID_QGIS” e concatenado aos valores que caracterizam cada talhão o número 100.000, conforme apresentado na imagem à esquerda.

OBS: O acréscimo dessa nova coluna também poderia ter sido feito no shape *1.1.Centroide* ao invés de agora.

Caminho QGIS: Tabela de atributos > Fied calculator (Ctrl+L) > Selecione a caixa *Create a new field* > Preencha Outputfield name: “ID_QGIS”; Output field type: Whole number (integer) > Na aba expression escrever: 100000||”Nome da coluna” > Clique “OK”.

6.2. Intersecção entre estradas e talhões



Nessa etapa é realizada a intersecção dos arquivos *1.2.Centroide_Buffer* (subitem 6.1) e *2.2.Estradas_ArestaBuffer* (subitem 5.1), tendo em vista identificar quais estradas intersectam em cada talhão.

Caminho QGIS: Processing > Toolbox > Vector overlay > Intersection > Input layer: “*1.2.Centroide_Buffer*”, Overlay layer: “*2.2.Estradas_ArestaBuffer*”

Nome do arquivo: 3.1.
IntersecaoEstrada_E_Talhao

6.2.1. Exportar tabela de atributos e organizar dados

Após a intersecção dos shapes, na tabela de atributos haverá uma coluna com a identificação dos talhões (ID_QGIS) e uma coluna com o número de identificação das estradas que se sobrepõem em cada talhão. Com isso, serão identificadas

cada estrada que possibilita o acesso a cada talhão. Além de que, com essa informação possibilita a composição do conjunto H_n do modelo matemático.

Para exportar a tabela de atributos do shape “3.1. IntersecaoEstrada_E_Talhao” basta seguir as explicações apresentadas no item “5.2.3.1. Exportar tabela de atributos” acima.
