



LARISSA PEREIRA MONTEIRO

**MODELO MATEMÁTICO DE INTEGRAÇÃO ENTRE COLHEITA
E TRANSPORTE FLORESTAL NO ABASTECIMENTO DE
MADEIRA**

LAVRAS – MG

2024

LARISSA PEREIRA MONTEIRO

**MODELO MATEMÁTICO DE INTEGRAÇÃO ENTRE COLHEITA FLORESTAL E
TRANSPORTE NO ABASTECIMENTO DE MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Florestal, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide

Orientador

LAVRAS – MG

2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais Terezinha e Wanderley e aos meus irmãos Thiago e Fernanda, por todo apoio desde sempre.

Aos meus amigos Guilherme e Rafael, que sempre estiveram comigo em todos os momentos desde a adolescência e que participaram de todas as minhas escolhas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide pelo apoio, incentivo, oportunidade e confiança. Também agradeço a dedicação durante a orientação e por todos os conselhos até aqui.

Às minhas amigas e companheiras de profissão Luana e Nayara, pelo apoio durante a execução desse trabalho, fundamental para sua conclusão.

À todas as pessoas que de alguma forma me inspiraram durante meu estágio na Gerdau Florestal, em especial ao meu tutor André pelos ensinamentos e apoio durante a execução das atividades na equipe de inovação.

À minhas companheiras da Rep172a, que me acolheram durante 4 anos e que me apoiaram em todos os momentos.

Aos meus amigos da Engenharia Ambiental Isabelly, Jean e Alex, que me incentivam todos os dias.

Ao meu amigo Michael, pelo incentivo as minhas escolhas profissionais até aqui e por acreditar no meu potencial antes mesmo de mim.

Às minhas amigas da Unipampa Yasmim, Maysa e Milena, por me acompanharem apesar da distância e pelos momentos de troca durante a execução deste trabalho.

Aos meus amigos do Laboratório de Sementes Florestais, em especial ao Professor José Márcio, Olivia, Patrícia, Cleise e Alessandra, pelos conselhos e pelo apoio.

Aos amigos que fiz no NEEC-Flora, responsáveis por tornar meus dias mais leves.

A todos os amigos que fiz ao longo da graduação, em especial os que estiveram comigo nas matérias de Manejo Florestal, Planejamento e Análise de Decisões Florestais e Colheita.

RESUMO

O Planejamento Florestal é um processo que auxilia o manejo florestal a organizar, racionalizar e otimizar operações e pode ser subdividido de maneira hierárquica em: estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo). A otimização na colheita florestal contempla uma série de restrições relacionadas aos custos de transporte, deslocamento de veículos, entre outros. Além disso, modelos com restrições espaciais de adjacência na otimização da colheita tem sido cada vez mais utilizados no mundo. Dado o contexto, o objetivo deste trabalho foi maximizar o volume de um plantio de *Pinus sp.* no agendamento de colheita e reforma, a nível operacional e por meio da otimização via PLIM, utilizando os seguintes cenários: (1) Agendamento tradicional de colheita, transporte e reforma, maximizando o volume total colhido e o volume esperado de colheita no próximo ciclo; (2) Agendamento tradicional de colheita, transporte e de restrições clonais de adjacência do tipo URM na reforma, maximizando o volume total colhido e o volume esperado de colheita no próximo ciclo. A área analisada foi de um povoamento simulado que consistiu em 50 talhões aptos para o corte, totalizando uma área de 1.897,61 hectares. Foram escolhidos dois tipos de veículos para o transporte e 8 clones para a reforma. A execução foi feita através do *solver* Gurobi em linguagem Python. Não houve diferenças em relação ao volume, tipo de veículo para transporte e número de viagens entre os cenários. Em relação a reforma, no cenário 1 o modelo escolheu apenas o clone 1 e no cenário 2 foram escolhidos os clones 1, 2, 4, 6 e 7. Em relação ao volume esperado no próximo ciclo, houve uma diferença percentual de 2,41% entre os cenários, onde o cenário com restrições clonais de adjacência obteve o menor volume. Apesar desta diferença, pode-se concluir que o modelo foi eficiente tanto na maximização de volume quanto no planejamento de transporte e reforma a nível operacional. São necessários estudos adicionais de ganhos indiretos com a escolha por mosaicos clonais para confirmar a viabilidade de aplicação do modelo.

Palavras-chave: Planejamento Florestal. Otimização. Restrições de adjacência. Planejamento Operacional.

ABSTRACT

Forest Planning is a process that assists in organizing, rationalizing, and optimizing forest management operations and can be hierarchically subdivided into: strategic (long term), tactical (medium term), and operational (short term). Optimization in forest harvesting involves a series of constraints related to transportation costs, vehicle movement, among others. Additionally, models with spatial adjacency constraints in harvesting optimization have been increasingly used worldwide. Given the context, the objective of this work was to maximize the volume of a *Pinus sp.* plantation in the scheduling of harvesting and reform at the operational level through optimization via PLIM, using the following scenarios: (1) Traditional scheduling of harvesting, transportation, and reform, maximizing the total harvested volume and the expected volume of harvesting in the next cycle; (2) Traditional scheduling of harvesting, transportation, and reform with clonal adjacency constraints of the URM type in reform, maximizing the total harvested volume and the expected volume of harvesting in the next cycle. The analysed area consisted of a simulated stand comprising 50 stands suitable for cutting, totalling an area of 1.897,61 hectares. Two types of vehicles were chosen for transportation, and 8 clones were selected for reform. The execution was performed using the Gurobi solver in the Python language. There were no differences in volume, type of transportation vehicle, and number of trips between scenarios. Regarding reform, in scenario 1, the model chose only clone 1, and in scenario 2, clones 1, 2, 4, 6, and 7 were chosen. Regarding the expected volume in the next cycle, there was a percentage difference of 2,41% between scenarios, where the scenario with clonal adjacency constraints obtained the lowest volume. Despite this difference, it can be concluded that the model was efficient in both volume maximization and operational-level transportation and reform planning. Additional studies on indirect gains with the choice of clonal mosaics are necessary to confirm the feasibility of applying the model.

Keywords: Forest Planning. Optimization. Adjacency constraints. Operational Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção anual de madeira com e sem restrições de equilíbrio, utilizando restrições de adjacência. A figura (a) apresenta o volume médio de madeira produzido nos cenários sem restrições de equilíbrio e a figura (b) exibe o volume médio de madeira produzido considerando restrições de equilíbrio.....	12
Figura 2 – Fluxo com métodos de manejo integrado de pragas florestais.....	14
Figura 3 – Compilação de critérios ESG.....	16
Figura 4 – Caracterização inicial da área: (a) clones aptos para o corte, (b) porcentagem ocupada por clones em ha, (c) volume total (m ³) e área por idade e (d) número de talhões por idade.....	18
Figura 5 – Exemplificação de como foi considerado o limite para consideração de adjacência nos talhões.....	22
Figura 6 – Planejamento de reforma para os talhões em relação aos clones de acordo com os cenários 1 (a) e 2 (b)	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Volume esperado por cada clone nas idades de corte.....	19
Tabela 2 - Resultado para volumes e número de viagens para cenários 1 e 2.....	23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO.....	9
2.1 Geral	9
2.2 Específicos	10
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
3.1 Evolução da Colheita Florestal no Brasil e sustentabilidade.....	10
3.2 Otimização no planejamento florestal.....	11
3.3 Clones e manejo integrado de pragas.....	13
3.4 Setor florestal e sustentabilidade	15
4. Material e métodos.....	17
4.1 Caracterização inicial.....	17
4.2 Desenvolvimento do modelo de programação linear inteira mista	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6. CONCLUSÃO	26
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1. INTRODUÇÃO

O manejo florestal pode ser definido como a classificação de métodos empresariais e princípios técnicos em uma dada produção (SILVA, 1996). Além disso, o manejo florestal está intimamente relacionado ao uso dos recursos florestais de maneira sustentável, a fim de garantir usufruto destes recursos para gerações futuras (SCOLFORO 1998 citado por MATOS et al., 2019). Adicionalmente, o planejamento florestal é um processo que auxilia o manejo florestal pois por meio deste é possível organizar, racionalizar e otimizar operações, com a finalidade de identificar fatores que possam interferir positivamente e negativamente no processo de produção florestal. Dessa forma, o planejamento florestal pode ser subdividido de maneira hierárquica em: estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo) (MATOS et al., 2019).

O abastecimento da indústria florestal, etapa esta que integra o planejamento florestal, desempenha um papel crucial para o processo produtivo. O planejamento de colheita e transporte de madeira muitas vezes pode envolver o abastecimento de uma unidade através de várias fazendas fornecedoras (SOUZA, 2000). Dentre as etapas do abastecimento, o transporte é a etapa mais desafiadora, principalmente pelo seu elevado custo. Martini e Leite, (1988) consideram o abastecimento e seu planejamento como cruciais para a competitividade da indústria, além da própria viabilidade econômica do empreendimento, dando ênfase na etapa de custos de transporte. Souza (2000), em seu trabalho, utilizou a Programação Linear para diminuir os custos de transporte e assim melhorar a dinâmica de abastecimento de indústrias, onde utilizou três modelos diferentes que diminuíram os custos de transporte.

Ainda sobre as atividades e operações florestais em que o manejo florestal engloba, podemos destacar a importância econômica da colheita florestal, sendo esta uma atividade que representa ao menos metade do custo final de um produto madeireiro (MACHADO, 1984; DA ROCHA, 2009; MUTZ, 2022). No planejamento florestal a nível tático se encontram as tomadas de decisões relacionadas à colheita florestal, utilizando ferramentas de otimização florestal (GONÇALVES, 2022). A otimização na colheita florestal contempla uma série de restrições relacionadas aos custos de transporte, deslocamento de veículos, entre outros. Pode-se encontrar trabalhos na literatura como o de Cardoso (2016), que utilizou ferramentas de otimização para obter melhores rotas de transporte após a colheita a fim de diminuir os custos, em que obteve redução de 13% ao otimizar a rota. No entanto, é comum que haja cenários em que não são consideradas relações espaciais entre unidades de manejo nestes modelos, podendo gerar impactos desfavoráveis ao meio ambiente (GOMIDE, 2010).

Ao relacionar a colheita florestal com o meio ambiente, percebemos grandes consequências de colheitas em grandes áreas, como o impacto estético, de maior erosão do solo devido a área exposta e maiores impactos à fauna local (SFEIR, 2020). Thompson et al. (1998), destaca também maiores propensões ao fogo quando há uma grande área contínua colhida, ao analisar os riscos de incêndio utilizando diferentes simulações de agenda de colheita. Nesse sentido, existem os modelos que consideram restrições de adjacência em talhões, onde há uma restrição de tempo mínimo na colheita de unidades vizinhas, o chamado conceito de tempo de *green-up* delay (BORGES et al., 2014; SFEIR, 2020).

No mundo, os modelos de colheita com restrições de adjacência têm sido cada vez mais discutidos. No estudo de Rodrigues et al. (2021), a relação entre a conservação do solo e o manejo florestal foi explorada a nível de paisagem ao longo do tempo. Os resultados indicaram que é viável contemplar a fragmentação da paisagem para atender à demanda da indústria por produtos madeireiros, destacando a importância dessa abordagem na busca por práticas sustentáveis. Na Nova Zelândia, existem trabalhos de otimização envolvendo as restrições de adjacência, como o de Mcnaughton et al. (1998), sendo gerado um modelo matemático envolvendo tais restrições. Essas podem subdividir as restrições de adjacência em: URM (*Unit Restriction Models*) e ARM (*Area Restriction Models*). A primeira subdivisão (URM) impede que unidades de manejo (talhões) adjacentes sejam colhidas no mesmo período do horizonte de planejamento. Sendo assim, a área máxima a ser colhida é dada pelo tamanho da unidade de manejo. A ARM, por sua vez, permite que a colheita seja realizada em talhões ou unidades vizinhas, contanto que haja uma área máxima de colheita em um mesmo período do horizonte de planejamento (STEIGER et al., 2003; KAŠPAR et al., 2016).

Ainda em relação aos modelos que incorporam restrições de adjacência, é possível encontrar estudos que estabelecem conexões entre essas restrições e diferentes tipos de clones, exemplificado pelo trabalho de Martins et al. (2017). Nesse estudo, foi explorada a interação entre mosaicos clonais e restrições do tipo URM, com o objetivo de aprimorar a segurança das florestas e controlar de forma mais eficaz a disseminação de pragas e doenças. Ao final da pesquisa, foi possível identificar um valor mais prático e aplicável para o setor florestal, quando comparado às restrições URM convencionais.

2. OBJETIVO

2.1 Geral

Dado o contexto, o objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de um modelo matemático de programação linear inteira mista para maximizar o transporte de madeira e garantir uma produção volumétrica máxima futura na próxima rotação em um plantio simulado de *Pinus sp.* Além disso, o modelo busca a formação de mosaicos clonais para aumentar a resistência a propagação de patógenos.

2.2 Específicos

- Analisar a integração entre a liberação da madeira no campo para o transporte e a reforma;
- Predizer o número de viagens e o volume transportado por veículo (bitrem ou tritrem) deva ser ativado;
- Analisar o efeito da restrição de adjacência aplicada na heterogeneidade clonal.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Evolução da Colheita Florestal no Brasil e sustentabilidade

A história da colheita florestal no Brasil remonta ao período inicial da colonização, quando a exploração do pau-brasil se estabeleceu juntamente com a expansão demográfica e dominação do território. Infelizmente, esse cenário caracterizou-se por uma exploração predatória e insustentável das florestas brasileiras, onde predominava o trabalho braçal apoiado por ferramentas como o machado (ALTOÉ, 2008).

No entanto, ao longo do século XX, surgiram os plantios de espécies florestais exóticas, como as dos gêneros *Eucalyptus* e o *Pinus*, o que resultou em uma diminuição da pressão sobre as florestas nativas (Ministério do Meio Ambiente, Sistema Nacional de Informações Florestais). Nesse contexto, também ocorreram avanços significativos nas técnicas e ferramentas utilizadas na colheita florestal (ALTOÉ, 2008).

Apesar disso, somente na década de 90 ocorreu a introdução de maquinários de corte e arraste, como o Harvester e o Feller-buncher, representando uma mudança importante no processo de colheita florestal. Essas máquinas proporcionaram maior eficiência e agilidade na extração da madeira, substituindo em grande parte o trabalho manual (ALTOÉ, 2008).

Com o passar dos anos, a colheita florestal no Brasil continuou a evoluir, impulsionada pelo desenvolvimento de novas tecnologias e pela busca por práticas mais sustentáveis. Podemos observar os avanços com a sustentabilidade na colheita florestal em um

estudo de Vasconcelos (2020) sobre o aprender da sustentabilidade na colheita em uma empresa de base florestal. Tal estudo destaca o planejamento como aliado nas discussões e práticas envolvendo sustentabilidade na área e demonstra avanços empresariais relacionados ao aprendizado do tema. Apesar dos avanços na área, é importante destacar que ainda existem desafios a serem enfrentados para garantir uma colheita florestal verdadeiramente sustentável no Brasil.

3.2 Otimização no planejamento florestal

Estamos cercados por decisões ao longo de toda nossa vida, as quais podem exigir tempo para reflexões e análises prévias. Na área florestal, de forma semelhante, essas decisões frequentemente envolvem um grande e complexo número de alternativas, combinando variáveis econômicas e ecológicas. Com base nesta problemática, a otimização no planejamento florestal surge como uma abordagem que combina métodos científicos e computacionais para resolver problemas, proporcionando suporte na tomada de decisões (BETTINGER, 2009). Um marco importante para que fosse possível o avanço na otimização florestal foi a metodologia simplex, desenvolvida por Dantzig na década de 40, que desempenha um papel fundamental na solução de problemas complexos (GOMIDE, 2013a).

Atualmente, há ainda a busca por novos projetos relacionados ao tema, principalmente em relação ao planejamento espacial, apesar de ser notório o avanço da tecnologia no setor florestal nos últimos anos (CASTRO, 2018). A otimização também está intimamente ligada ao avanço das tecnologias de coleta de dados, ao desenvolvimento de algoritmos e à utilização de sistemas de informação geográfica (SIG). Pecora et al. (2014) utilizaram a otimização em conjunto com ferramentas de SIG para mapear e otimizar a exploração florestal em regiões montanhosas na Europa, obtendo resultados satisfatórios em seu projeto, como um melhor planejamento das áreas e soluções de corte mais adequadas às condições de cada área. Assim, com base no exposto anteriormente, é importante ressaltar a relevância da otimização tanto no meio acadêmico quanto no setor florestal.

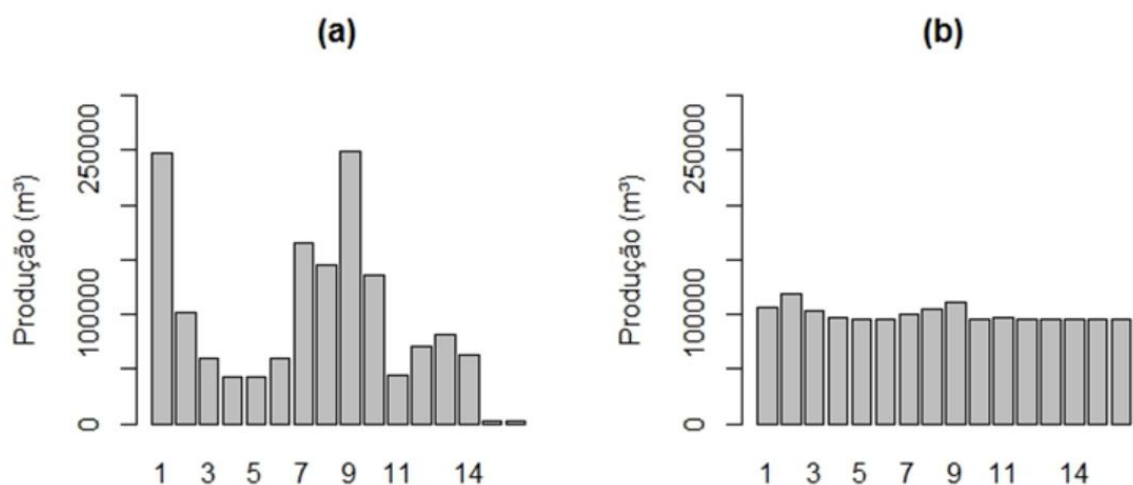
O planejamento florestal espacial teve início na década de 70, juntamente com o desenvolvimento das restrições de adjacência. Nesse período, foi elaborada a restrição do tipo URM (*Unit Restriction Model*), seguida pelo modelo do tipo ARM (*Area Restriction Model*). A URM não autoriza o corte de unidades vizinhas, ao passo que a ARM possibilita essa ação. No entanto, ambas as restrições compartilham a necessidade de utilizar variáveis inteiras

(GOMIDE et al., 2013b). O planejamento florestal espacial tem como característica a análise de padrões de paisagem florestal, com enfoque nas atividades de manejo florestal e de ferramentas específicas relacionadas a planos florestais e políticas alternativas (STANG, 2016).

Um acontecimento marcante para a origem do planejamento florestal espacial foi o crescimento de discussões ambientais e sociais entre os países consumidores de produtos florestais (GOMIDE, 2013a). Além disso, é notável o interesse do setor privado em utilizar técnicas que melhorem o balanço entre silvicultura e qualidade ambiental, aumentando assim a qualidade visual de suas áreas (STANG, 2016).

Gonçalves, (2022), ao estudar restrições de adjacência em uma floresta simulada de 100 talhões de *Pinus taeda*, constatou que, para este cenário, o valor de receita reduziu menos em restrições do tipo URM quando comparadas às restrições do tipo ARM. Augustynczyk, (2015), por sua vez, analisou e comparou análises de restrições do tipo ARM e URM em 236 talhões de *Pinus* e *Eucalyptus* e pôde concluir que ambos os tipos de abordagem são viáveis para o agendamento de colheita florestal, onde as restrições do tipo ARM obtiveram uma menor queda de Valor Presente Líquido (VPL) quando comparadas às restrições do tipo URM. A Figura 1 exemplifica o equilíbrio da produção anual para dois dos cenários utilizados, apenas aplicando restrições espaciais do tipo ARM e URM juntamente com o controle de grandes flutuações no suprimento de madeira, que são chamados de restrições de equilíbrio.

Figura 1 - Produção anual de madeira com e sem restrições de equilíbrio, utilizando restrições de adjacência. A figura (a) apresenta o volume médio de madeira produzido nos cenários sem restrições de equilíbrio e a figura (b) exibe o volume médio de madeira produzido considerando restrições de equilíbrio.



Fonte: Augustynczyk, (2015)

RÍOS-MERCADO (2023), por sua vez, integrou atividades de planejamento florestal espacial de colheita em uma área nativa no noroeste Mexicano, onde apesar de o modelo não ter gerado resultados significativos em termos financeiros, pôde-se reforçar benefícios em relação a conservação da vida silvestre e contribuir com os modelos anteriores já utilizados na literatura. Desta maneira, é possível destacar os benefícios ao meio ambiente proporcionados por ferramentas deste tipo de planejamento.

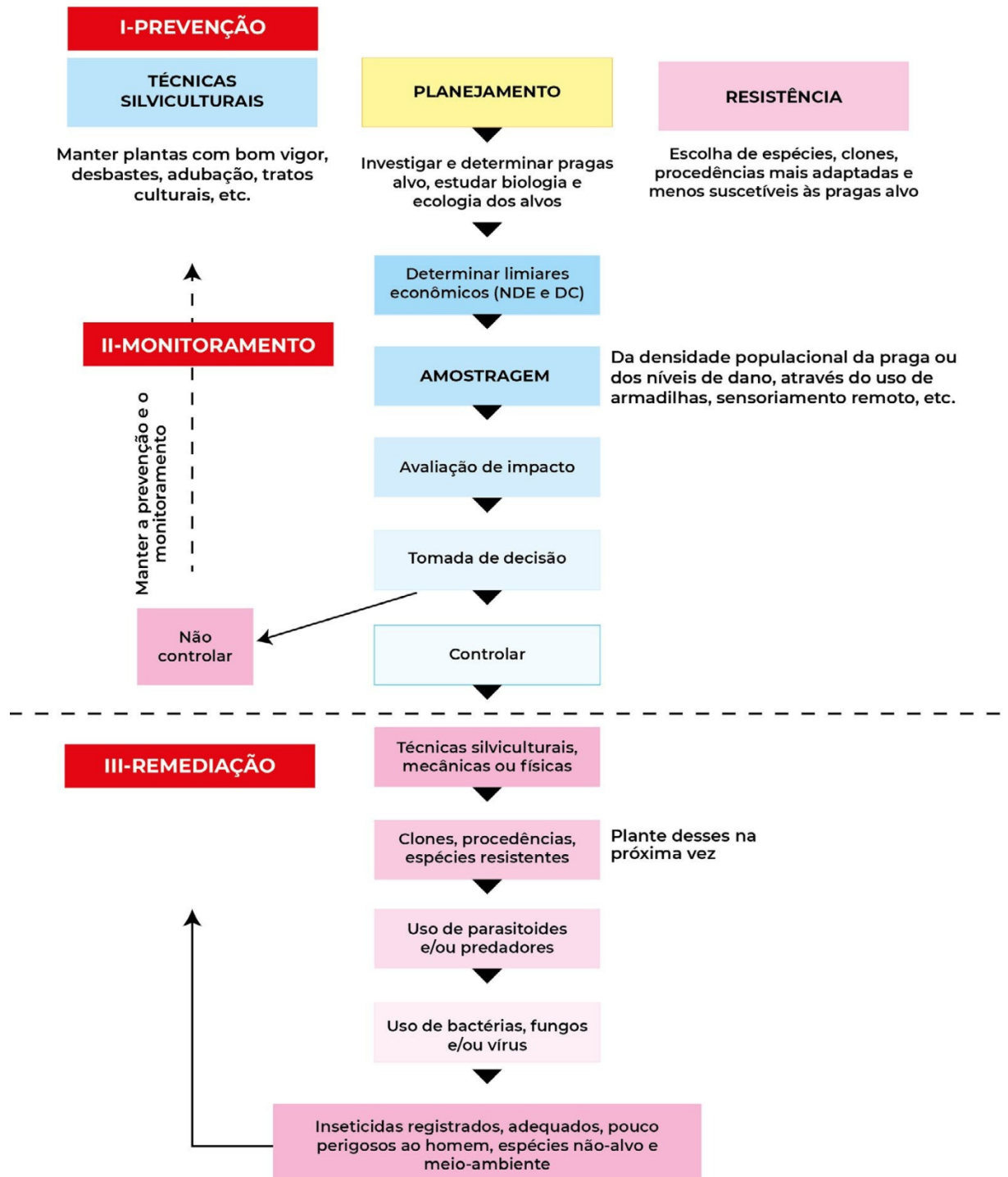
Apesar disso, são encontrados ainda desafios relacionados ao planejamento florestal espacial, onde a complexidade maior do modelo é uma destas limitações, como afirmam ÖHMAN e ERIKSSON (2010). De acordo com os trabalhos citados anteriormente, é possível destacar que o planejamento florestal espacial possui também, quando combinado a restrições espaciais de adjacência e de forma geral, uma redução do Valor Presente Líquido das atividades realizadas. Entretanto, é essencial o uso e o estudo de ferramentas que auxiliem na tomada de decisões levando em consideração também os fatores ecológicos e de paisagem.

3.3 Clones e manejo integrado de pragas

Os plantios florestais, de um modo geral, são estabelecidos com homogeneidade em termos clonais, entre outros fatores. Devido a esta homogeneidade, insetos fitófagos podem ser favorecidos pela alta disponibilidade de alimentos e ausência de inimigos naturais, tornando-se pragas florestais (IEDE et al., 2014). Nesse contexto, pode-se notar uma preocupação no que diz respeito ao controle e prevenção de potenciais pragas. Silva et al. (2020), discutem práticas de prevenção e controle de insetos-praga em povoamentos florestais, onde, dentre alternativas, citam práticas de controle silvicultural, que visam deixar o ambiente menos susceptível ao ataque dos insetos-praga. Dentre as operações de controle silvicultural, pode-se citar o mosaico clonal e até mesmo o mosaico entre áreas plantadas e nativas, a fim de garantir condições diferentes, para um ambiente equilibrado e aumento de inimigos naturais para as pragas.

Na Figura 2, pode-se visualizar como são os métodos de prevenção e remediação para o controle de pragas florestais de maneira objetiva, onde se encontra o controle silvicultural como um dos métodos de prevenção. A partir desta figura, é possível ter o entendimento de que o manejo integrado de pragas pode ser feito por mais de um método e que o monitoramento é uma etapa importante para os métodos de prevenção.

Figura 2 – Fluxo com métodos de manejo integrado de pragas florestais.



Fonte: Alves, (2021).

O trabalho de Martins et al., (2017), citado anteriormente, nos traz a viabilidade do uso de mosaicos clonais no planejamento florestal espacial, apesar de ressaltar que não é possível afirmar o valor estimado de economia com controle de pragas e doenças, nesse estudo em

específico. Não foram encontrados trabalhos relacionando mosaicos clonais e *Pinus sp.*, o que nos mostra uma grande possibilidade de estudo sobre esse tema, tendo em vista o amplo uso da espécie a nível comercial no Brasil. De acordo com o Relatório do Instituto Brasileiro de Árvores (2022), o Pinus é atualmente a segunda maior cultura de floresta plantada no Brasil, representando uma área de plantio de 1,93 milhão de hectares.

3.4 Setor florestal e sustentabilidade

A visão empresarial em relação à questão ambiental ganhou força e se transformou em oportunidade a partir da década de 90, impulsionada por mudanças significativas no tratamento das questões ambientais. Essas transformações foram resultado do destaque internacional dado ao tema "floresta". Setores relacionados ao ramo florestal foram pioneiros na adoção de regulamentações florestais, comparativamente a outras indústrias (NARDELLI, 2001). Um marco crucial para a sustentabilidade no setor foi a criação da certificação florestal Forest Stewardship Council (FSC) em 1993. Essa certificação foi estabelecida com o objetivo de assegurar um manejo florestal que fosse ambientalmente responsável, economicamente viável e socialmente benéfico. Paralelamente, um conjunto importante de normas ISO 14.000 emergiu, visando uma gestão ambiental mais robusta dos recursos empregados por empreendimentos, abrangendo seus serviços, atividades e produtos (NARDELLI, 2001).

Avançando para o século seguinte, em 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram estabelecidos e incorporados na "Agenda 2030". Compostos por 17 objetivos, os ODS têm a finalidade de abordar os principais desafios globais, incluindo os desafios ambientais, como a conservação ambiental e a mitigação das mudanças climáticas globais (KRONEMBERGER, 2019). Em suas pesquisas documentais sobre as ações relacionadas aos ODS nas 10 principais empresas brasileiras, Penna et al. (2022) constataram uma forte adesão dessas empresas aos indicadores de sustentabilidade.

Outra ferramenta importante para sustentabilidade no setor florestal foi o conceito ESG, que teve sua origem em 2004 no documento "Who Cares Wins", produzido pelo Pacto Global em parceria com o Banco Mundial. Esse documento introduziu critérios que envolvem questões sociais, ambientais e de governança no contexto do mercado financeiro. Embora tenha sido criado em 2004, o termo ganhou notoriedade significativa a partir de 2020, quando o CEO da BlackRock, o maior fundo de investimentos do mundo, enfatizou a sustentabilidade como uma prioridade em seus investimentos (OLIVEIRA et al., 2022).

Na Figura 3, é possível observar com maiores detalhes como, de um modo geral, são utilizados os critérios de ESG no setor florestal, onde nos critérios Ambientais são citados a incorporação de impactos ambientais na estratégia do negócio, uso sustentável dos recursos e biodiversidade, que se correlacionam indiretamente a este trabalho.

Figura 3 – Compilação de critérios ESG.

Compilação de Critérios ESG		
Ambiental	Social	Governança
Incorporação de impactos ambientais na estratégia de negócio	Direitos humanos	Integridade e combate à corrupção
Uso sustentável dos recursos	Relações de trabalho	Política pública e atividades políticas
Recursos sólidos	Saúde e Segurança	Gestão de risco e liquidez de ativos
Água	Relações com a comunidade	Evasão fiscal
Processos industriais de alto impacto	Impacto social	Metas ESG para gestores
Emissões atmosféricas	Diversidade e inclusão	Transparência de informações
Biodiversidade	Filantropia e voluntariado	Ética e conduta empresarial
Ferramentas de Gestão Ambiental	Proteção de bens e patrimônios culturais	Incorporação de fatores ESG na gestão
Degradação e contaminação do solo		Segurança da informação
Mudanças climáticas		
Legislação ambiental		

Fonte: Lima, (2022).

No contexto atual, as atividades florestais sustentáveis trazem benefícios. De acordo com o relatório anual de 2022 do Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ), a área de florestas plantadas alcançou 9,93 milhões de hectares ao final do ano. Diante dessa extensa área de floresta plantada e das crescentes preocupações climáticas, emergem novos conceitos e inquietações relacionadas à sustentabilidade e ao meio ambiente. O relatório do IBÁ também destaca que o setor abrange atualmente 6,05 milhões de hectares de florestas nativas, dedicados à conservação. Nesse sentido, o relatório também descreve como notável a abordagem moderna de manejo adotada por muitas empresas no setor, que inclui a utilização de mosaicos florestais entre as áreas de florestas plantadas e as áreas nativas.

Os benefícios gerados pelo uso de atividades florestais sustentáveis incluem também o marketing verde. Conforme enfatizado por Gonzaga (2005), o marketing verde se baseia na geração de riqueza com a redução significativa dos impactos ambientais negativos. O crescimento dos conhecimentos sobre o meio ambiente, o desenvolvimento de novas tecnologias e o aumento das demandas por ações ambientalmente conscientes têm contribuído para a adaptação do mercado a esse cenário. Portanto, uma tendência observada é o aumento

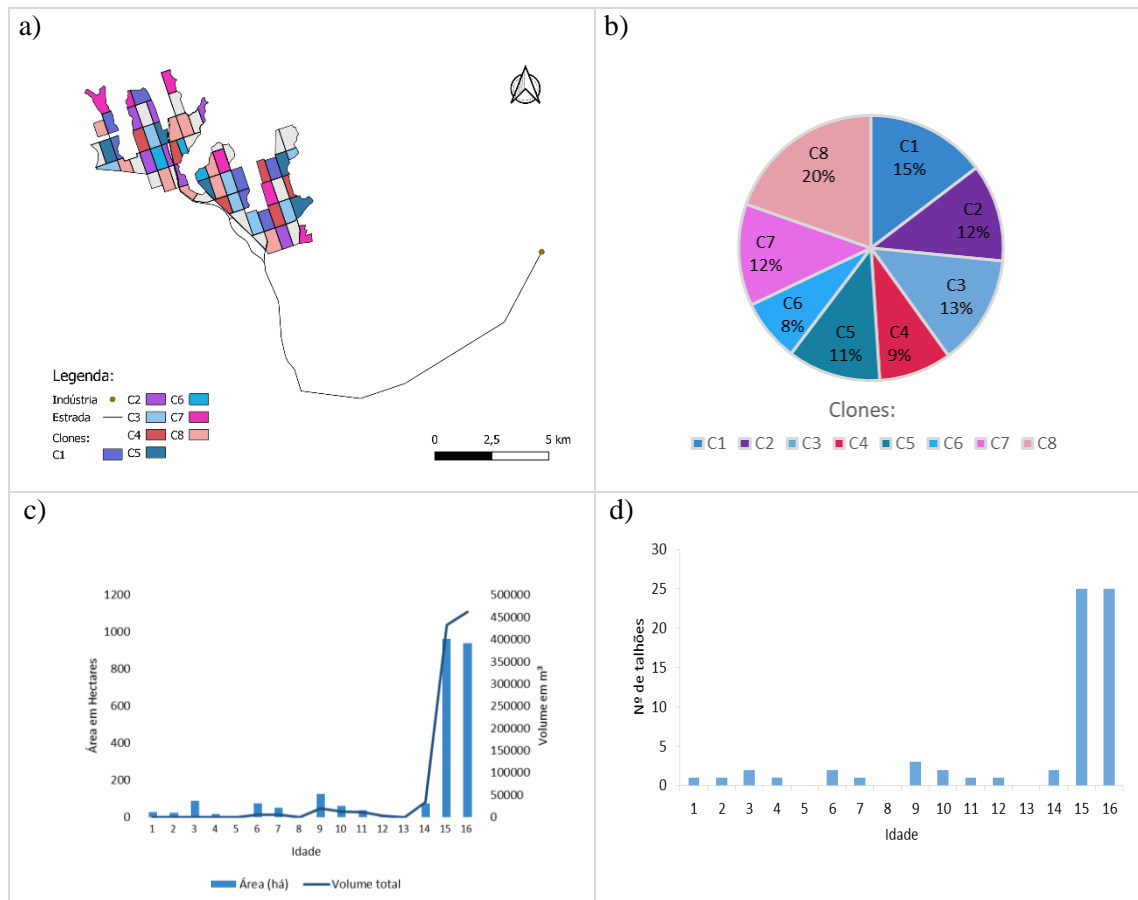
das práticas ambientais no setor nos próximos anos. Além disso, os artigos e relatórios mencionados indicam uma abordagem positiva em relação a ações que promovam benefícios ao meio ambiente.

4. Material e métodos

4.1 Caracterização inicial

A área de estudo a qual o planejamento espacial foi aplicado é advinda de uma base de dados simulada, que compreende 67 talhões e uma área total aproximada de 2.492 ha. A área compreende plantios envolvendo 8 tipos de clones que foram distribuídos aleatoriamente, sendo simulada ainda a idade em cada talhão. Os dados foram simulados em Python (versão 3.10) com o auxílio das bibliotecas Pandas e Random. Essa estratégia adotada é comumente aplicada para o teste de modelos matemáticos. O efeito espacial do clone presente no talhão foi simulado para mensurar a questão da adjacência, já a idade para a disponibilidade de colheita. Optou-se pela disponibilidade da maioria dos talhões próximo à idade permitida para o corte (15 e 16 anos), manipulação realizada propositalmente para que haja uma diferença na aplicação da adjacência a nível operacional quando comparado ao controle. Na Figura 1(a), pode-se observar a distribuição dos talhões por clone e a localização da indústria em relação à área plantada, além dos talhões aptos para o corte. Do total de talhões da área analisada, somente 50 foram considerados aptos para o corte, totalizando 1.897,61 hectares. A Figura 1(b) encontra-se a porcentagem de área que cada Clone ocupa. Já na Figura 1(c), é analisado o volume total e área por idade de plantio. Por fim, na Figura 1(d), é possível analisar o número de talhões por idade. Para simular esses dados, foi determinado que 70% dos talhões tivessem idade ótima para corte e que os clones tivessem uma disposição aleatória.

Figura 4 – Caracterização inicial da área: (a) clones aptos para o corte, (b) porcentagem ocupada por clones em ha, (c) volume total (m³) e área por idade e (d) número de talhões por idade.



Fonte: do autor (2024)

4.2 Desenvolvimento do modelo de programação linear inteira mista

Apartir da estruturação espacial e produtiva da área de estudo foi então desenvolvido um modelo de programação matemática para resolver o problema de planejamento em questão. O problema refere-se à tomada de decisão quando há várias alternativas de corte, uma vez que existem muitos talhões aptos ao corte. Além disso, a logística de transporte também se torna um grande desafio para o planejamento, onde se busca a melhor opção quanto ao número de viagens.

Um horizonte de planejamento de 3 meses foi adotado para proporcionar um nível maior de realidade e detalhamento, já que o problema se caracteriza no nível operacional. Esse nível há uma maior demanda de pesquisa (Matos et al., 2021), o que direcionou os esforços em apresentar um modelo matemático.

Os volumes estimados para cada clone, presente na base em dados, levou em consideração estudos disponíveis na literatura, considerando uma porcentagem sobre os valores médios (GEORGIN, 2015; MACHADO, 2005). Devido a escala temporal do problema e um horizonte de planejamento de 3 meses, adotou-se o cálculo do IMM (Incremento Médio Mensal) para contemplar o crescimento dos talhões não colhidos imediatamente no primeiro mês. Esse incremento foi acrescido como uma taxa fixa mensal ao volume inicial predito. Na Tabela 1 é possível observar o volume esperado (m^3/ha) por cada clone nas idades de corte em cada ano do HP, de acordo com o Incremento Médio Mensal (IMM).

Tabela 1 – Volume esperado por cada clone nas idades de corte.

CLONE	IDADE (anos)	IMM ($m^3/ha.mês$)	Volume mês 1 (m^3/ha)	Volume mês 2 (m^3/ha)	Volume mês 3 (m^3/ha)
1	15	2,82	511,20	514,02	516,85
1	16	2,87	554,40	557,27	560,14
2	15	2,68	485,64	488,32	491
2	16	2,73	526,68	529,41	532,14
3	15	2,48	448,98	451,46	453,94
3	16	2,53	488,58	491,11	493,64
4	15	2,58	466,94	469,52	472,10
4	16	2,63	508,12	510,75	513,38
5	15	2,12	384,77	386,89	389,02
5	16	2,18	420,76	422,94	425,12
6	15	2,73	495,86	498,60	501,34
6	16	2,78	537,77	540,55	543,34
7	15	2,71	490,90	493,61	496,33
7	16	2,75	532,39	535,15	537,91
8	15	2,14	388,62	390,76	392,91
8	16	2,20	424,97	427,17	429,37

Fonte: do autor (2024)

No que diz respeito à capacidade de carga dos veículos (Bitrem e Tritrem) optou-se por utilizar um valor aproximado de $0,45 g/cm^3$ para a densidade da madeira. Essa escolha foi baseada nos valores de densidade básica extraídos do trabalho de Zegarra (2011). Posteriormente, a carga para cada tipo de veículo foi convertida para metros cúbicos (m^3), visando a padronização das unidades durante a elaboração das restrições. Os veículos do tipo Bitrem adotou-se um valor máximo de carga de $126,67 m^3$ (57 toneladas), e $164,44 m^3$ (74 toneladas) e para veículos do tipo Tritrem, conforme Alves (2011). Para dar maior realidade ao problema foram definidas as horas efetivas de trabalho por veículo/turno, como sendo 6 horas por dia em dois turnos. Um número total de 70 veículos (Bitrem) e 50 veículos

(Tritrem) foram disponibilizados para o estudo de caso. Por outro lado, o tempo estimado médio de cada viagem (ida e volta) dos talhões até a indústria foi 5,30 horas (Bitrem) e 7,37 (Tritrem). Assim, o modelo matemático proposto foi formado pelas seguintes variáveis e coeficientes: v = volume colhido (m^3); w = madeira a ser transportada (m^3); c = variável de decisão binária para cada tipo de veículo (bitrem, tritrem); G = Número de clones; y = variável de decisão inteira para definir o número de viagens por tipo de veículo; x = variável de decisão binária para o corte do talhão; M = período de tempo em meses referente ao horizonte de planejamento; T = número de talhões do projeto; z = Variável de decisão binária para a reforma do talhão, sendo associado a produção futura v do clone g na próxima rotação; a_{tk} = matriz binária de vizinhança entre talhões utilizada na restrição [6] para gerar o mosaico clonal; v_{mt} = volume em relação ao mês de corte e ao talhão; x_{mt} = variável de decisão binária para o corte em cada mês e talhão; v_{mtg} = volume para reforma relacionado ao mês, talhão e tipo de clone; z_{mtg} = variável de decisão binária para a reforma em cada mês, talhão e clone.

A Função Objetivo [1] visa maximizar o volume v para a colheita e para a reforma (m^3), integrando volume e número de viagens no transporte. O primeiro termo da função objetivo indica o volume disponível no talhão t após a colheita no mês m , sendo somado a produção futura do clone g após a reforma. Essa estratégia visa maximizar a produção volumétrica tanto no presente, como no futuro. O último termo representa o número de viagens y para cada veículo c no talhão t após a colheita no mês m , relacionado a uma penalidade para transporte de meia carga, de 5000 m^3 , a fim de diminuir o número de viagens.

$$\text{Max Volume} \quad \sum_m^M \sum_t^T v_{mt} x_{mt} + \sum_m^M \sum_t^T \sum_g^G v_{mtg} z_{mtg} - 5.000 \sum_m^M \sum_t^T \sum_c^C y_{mtc} \quad [1]$$

A restrição [2] estabelece a obrigatoriedade na execução da colheita do talhão t pertencente ao projeto dentro de um período de tempo m , que ocorre entre o primeiro e o terceiro mês. Essa restrição é importante para integrar não apenas a colheita do talhão, mas também o transporte da madeira e a reforma da área pela silvicultura.

$$\sum_m^M x_{mt} = 1; \forall_t \quad [2]$$

A restrição [3] marca o momento da reforma do talhão t , no período de tempo m , utilizando o clone g . Essa estratégia garante a continuidade das atividades silviculturais

visando uma rotação futura e uma oferta de madeira. Porém, para o funcionamento correto dessa restrição deve-se integrar com o momento de corte do talhão, e para isso a restrição [4] garante essa relação linear. Teoricamente, o modelo poderia ser simplificado sem o uso da variável de decisão z , mas optou-se pela inclusão afim de facilitar a marcação da reforma envolvendo os clones.

$$\sum_m^M z_{mtg} = 1; \forall_t \forall_g \quad [3]$$

$$\sum_m^M x_{mt} - \sum_m^M z_{mtg} = 0; \forall_t \quad [4]$$

Nas restrições [5] e [6] atribuiu-se um intervalo volumétrico para suprir a demanda de madeira pela indústria. De forma hipotética, os valores adotados foram de 50% a 150% para os limites inferior e superior respectivamente. O modelo seguiu a partir de uma nova variável de decisão V o volume mensal a ser ofertado para a indústria.

$$\sum_m^M \sum_t^T v_{mt} x_{mt} \geq 0.5 V_m; \forall_m \quad [5]$$

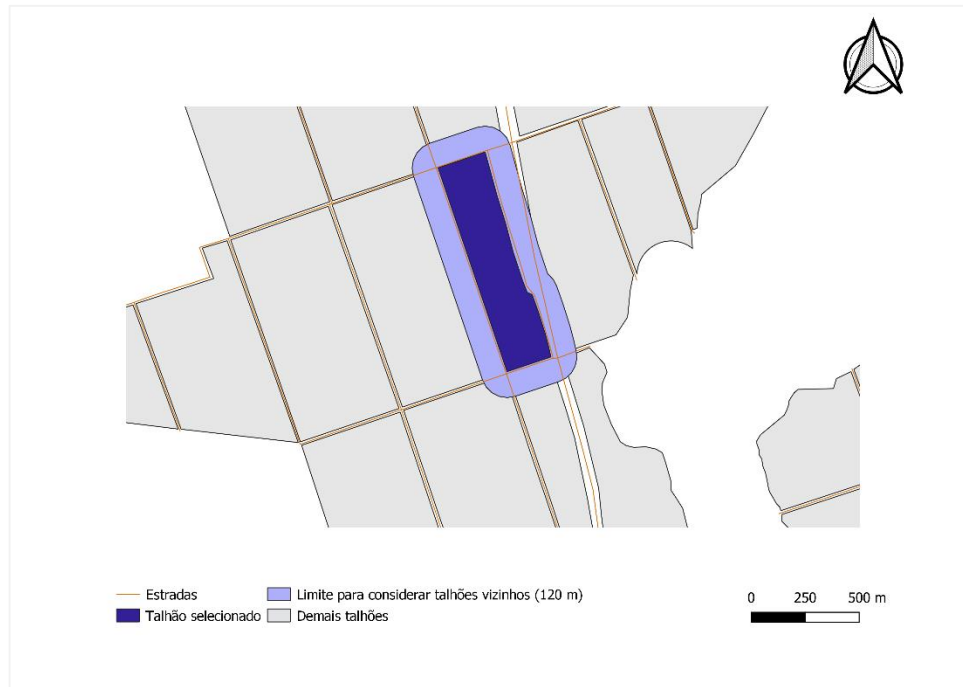
$$\sum_m^M \sum_t^T v_{mt} x_{mt} \leq 1.5 V_m; \forall_m \quad [6]$$

A restrição [7] estabelece a formação de mosaicos clonais, que impede o plantio de um mesmo clone entre talhões vizinhos, sendo a_{tk} correspondente à matriz binária de adjacência entre os talhões, utilizada para restringir a adjacência de clones iguais.

$$\sum_{t=1}^T a_{tk} \sum_m^M z_{mtg} + \left[\sum_t^T a_{tk} \right] \sum_m^M z_{mtg} \leq \sum_{t=1}^T a_{tk}; \forall_g; \forall_k; \forall_t \quad [7]$$

Para o processamento dos dados espaciais, primeiramente foi gerada uma matriz binária de adjacência no console do Python do Qgis (versão 3.26.3), utilizando 120 metros como faixa de distância máxima aceitável para que os talhões fossem considerados vizinhos, para incluir talhões somente separados por uma estrada como adjacentes. A Figura 5 ilustra a faixa de distância máxima aceitável, onde o limite foi aplicado para todos os talhões.

Figura 5 – Exemplificação de como foi considerado o limite para consideração de adjacência nos talhões.



Fonte: do autor (2024)

Afim de gerar um modelo mais próximo da realidade operacional foi necessário restringir a quantidade de tempo máximo H de operação de cada veículo no mês, sendo definida previamente. O tempo de deslocamento médio (ida/volta) h leva em consideração ainda filas, atrasos, carregamento e descarregamento da madeira. Nesse sentido, a restrição [8] está relacionada aos turnos de trabalho e a hora efetiva de trabalho diária (convertido em mês), sendo o volume transporte w pelo veículo c é controlado pela restrição [9], conforme sua capacidade de carga. Já a exaustão da madeira do talhão t é respeitada pela restrição [10], que garante que toda carga seja de fato transportada.

$$\sum_t^T h_{mtc} \cdot y_{mtc} \leq H_m ; \forall_m ; \forall_c \quad [8]$$

$$carga_c \cdot y_{mtc} - w_{mtc} \geq 0 ; \forall_m ; \forall_t ; \forall_c \quad [9]$$

$$v_{mt} \cdot x_{mt} = \sum_c^c w_{mtc} ; \forall_m ; \forall_t \quad [10]$$

Onde o Cenário 1 contempla todas as restrições com exceção da restrição clonal adjacência no momento da reforma [7] e o Cenário 2 contempla todas as restrições mencionadas anteriormente, incluindo a restrição clonal de adjacência no momento da reforma, responsável por um possível maior controle no manejo de pragas.

Os dois modelos foram desenvolvidos em Python versão 3.10 e resolvido pelo *solver* Gurobi 9.5 versão acadêmica. O modelo foi executado em um computador Inspiron 13-5378 com processador do tipo *Intel64 Family 6 Model 142 Stepping 9 GenuineIntel* e memória RAM de 16GB.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condução deste estudo possibilitou a obtenção de resultados importantes no que diz respeito aos processos de corte, reforma e transporte na área em análise. A execução do modelo permitiu uma avaliação detalhada da integração das operações, conferindo uma representação mais fiel a realidade do cenário em estudo. Estes resultados contribuíram para enriquecer nosso entendimento sobre as dinâmicas específicas relacionadas a cada fase operacional. À medida que é explorado o resultado do modelo, é possível obter orientações valiosas para melhorias práticas e estratégicas nas operações. O tempo total de processamento foi em torno de 30 segundos.

No total, foram geradas 3.600 alternativas de manejo. A seguir encontram-se os principais resultados encontrados através do modelo. Não foram identificadas diferenças nos volumes, número de viagens e tipos de veículos entre os dois cenários (Tabela 2). É notável que a maior parcela do volume foi colhida nos dois primeiros meses do horizonte de planejamento. Tal fato pode ser explicado, entre outros fatores, por uma maior flexibilidade do modelo em relação às restrições de demanda.

Tabela 2 – Resultado para volumes e número de viagens para cenários 1 e 2.

HP (Mês)	Nº de talhões	Volume Colhido (m ³)	Volume Colhido (%)	Viagens Bitrem (n)	Viagens Tritrem (n)
1	23	446.517,10	49,46	7	2.716
2	17	301.580,53	33,41	0	1.837
3	10	154.607,95	17,13	0	941
Total	50	902.705,57	100	7	5.494

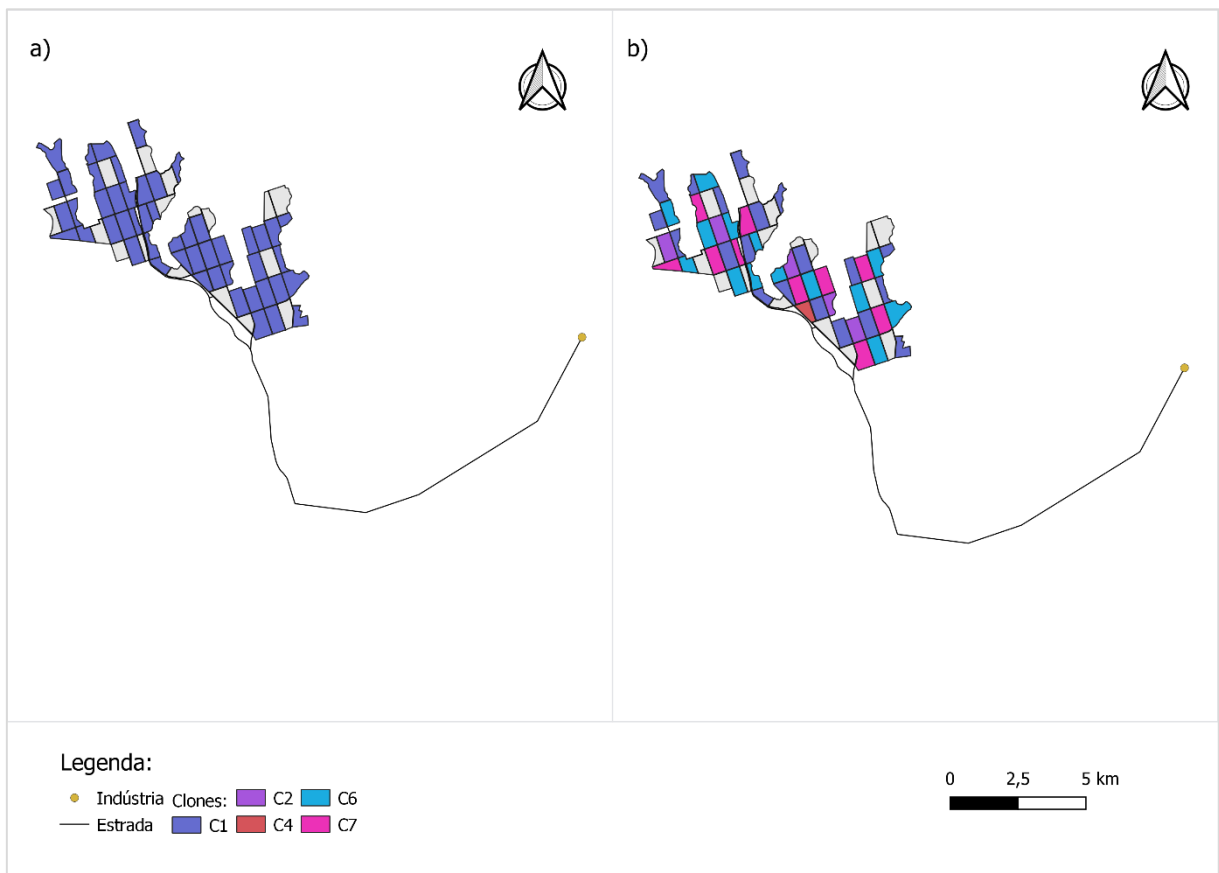
Fonte: do autor (2024)

Em relação ao número de viagens e tipo de transporte, também é notável a preferência do modelo pela viagem utilizando o Tritrem (99,98% das viagens), justamente pela restrição de capacidade de carga desse tipo de veículo. Além disso, a combinação entre esta restrição e

de horas trabalhadas acaba tendo um saldo positivo, pois apesar de menos veículos do tipo Tritrem e maior tempo de deslocamento, a cada deslocamento o veículo consegue transportar 22,97% a mais de m³. Em um contexto empresarial como esse, é viável conduzir análises subsequentes, como a decisão de modificar o modelo para utilizar exclusivamente um tipo de veículo ou incorporar variáveis e restrições adicionais, como a inclusão do Valor Presente Líquido (VPL) ou a adesão a um melhor controle logístico durante as viagens no modelo. Contudo, é importante destacar os desafios ao incorporar diversas variáveis ao modelo de otimização, pois isso pode resultar em aumento no tempo de processamento. Além disso, a nível operacional, situações atípicas podem surgir durante a execução das operações, como variações nos padrões de chuva que podem impactar a logística de transporte. Nesses casos, um acompanhamento mais assíduo torna-se necessário. Alcides (2013), destaca a importância de acompanhar o planejamento operacional com assiduidade, devido ao menor tempo para identificação de falhas, correções ou replanejamento.

Na reforma, por sua vez, ocorreram diferenças entre o Cenário 1 e Cenário 2 (Figura 6a). Tal resultado era esperado, uma vez que o modelo otimiza somente o volume na reforma e sem restrições espaciais de adjacência o modelo sempre irá optar por talhões com maior rendimento volumétrico (combinação clone e área). No entanto, para uma análise inicial, pode-se observar através da Figura 6b os clones potenciais, o que poderá auxiliar em futuras análises para tomadas de decisões.

Figura 6 – Planejamento de reforma para os talhões em relação aos clones de acordo com os cenários 1 (a) e 2 (b).



Fonte: do autor (2024)

O modelo poderá futuramente englobar novas variáveis em relação a escolha do clone, como densidade e teor de lignina, a depender da necessidade de implementação. Ao comparar o volume esperado para o próximo ciclo em ambos os cenários, há uma perda de 2,41% no Cenário 2, representando 25.487,41 m³ a menos ao final dos meses. Para definir essa perda de volume, seria imprescindível uma análise de custos complementar analisando a economia com controle de pragas e os ganhos com questões ambientais, para que ao final do ciclo o valor perdido com o volume faltante fosse compensado pelos ganhos indiretos com a escolha por mosaicos clonais. Martins et al., (2017), concluíram em seu trabalho que há a viabilidade do uso de mosaicos clonais, mas é válido ressaltar que a restrição clonal foi aplicada na colheita e a comparação volumétrica foi em relação a cenários com restrições, diferente deste trabalho.

A adição da variável de decisão de transporte juntamente dos números de veículos pode ter também influenciado na escolha pelos talhões colhidos em cada mês do HP e consequentemente pela diferença de volume obtido na reforma de ambos os cenários. Quando alteramos o número de veículos para um número mais baixo, temos uma melhor distribuição

do volume devido a ampla variação na restrição de demanda da indústria, caso contrário, a maior parcela do volume é colhida logo no primeiro mês do HP. Posteriormente, poderá também ser adicionado ao modelo restrições espaciais clonais de adjacência no momento da colheita, o que não foi realizado devido ao número expressivo de clones e pela heterogeneidade em suas disposições ao longo do povoamento, situação em que talvez a adjacência não fosse aplicada.

Uma consideração fundamental para o modelo durante a reforma de cada talhão foi a premissa de que a idade de colheita no próximo ciclo permanecesse igual à idade de colheita atual. Dessa forma, os talhões não serão colhidos no mesmo ano no próximo ciclo, resultando em uma colheita em mosaico em nível tático. Para um resultado mais assertivo, é necessário então que se realize o corte desses talhões nas idades em que foi calculado o volume esperado. Em um cenário ideal, a determinação da idade de colheita para cada talhão no próximo ciclo poderia ser derivada de um modelo de otimização em nível estratégico e utilizada como parâmetro de entrada do modelo deste trabalho para o volume esperado no próximo ciclo. Esse enfoque não apenas aumentaria a assertividade do modelo, mas também promoveria uma maior integração entre os níveis de planejamento. Matos et al., (2021), no entanto, encontrou apenas um trabalho publicado que integrasse mais de um nível do planejamento na pesquisa operacional. Deste modo, há uma certa dificuldade de validação da efetividade nesses casos.

6. CONCLUSÃO

Quando são aplicadas restrições de adjacência na reforma do tipo URM (Cenário 2), o volume esperado para o próximo ciclo na reforma reduz 2,41% em relação ao cenário sem restrições de adjacência (Cenário 1). Em relação ao volume total colhido, não houveram alterações entre os cenários, onde o volume total colhido foi de 902.705,57 m³. No entanto, não houve uma boa distribuição de volume ao longo dos meses do horizonte de planejamento, devido a flexibilização das restrições de demanda [5] e mudança no número de veículos disponíveis. Em relação ao transporte, o veículo do tipo tritrem se tornou mais viável para o uso, devido a escolha por esse tipo de veículo em 99,98% das viagens planejadas pelo modelo. Para o modelo, o total de viagens nos 3 primeiros meses foi de 5.501, com um volume transportado de 902.705,57 m³ e todo o volume colhido foi planejado também para o transporte. O Cenário 1 obteve um resultado homogêneo para reforma em relação aos clones e selecionou somente o clone com maior volume esperado. Já o Cenário 2 entregou uma

variedade maior de clones e somente clones potenciais, com um maior volume esperado. Devido a boa integração entre colheita – transporte – reforma na execução do modelo, conclui-se que este foi eficiente tanto na maximização de volume quanto no planejamento de transporte e reforma a nível operacional. No entanto, em relação às restrições de adjacência do tipo URM aplicadas na reforma, são necessários estudos adicionais de ganhos indiretos com a escolha por mosaicos clonais para confirmar a viabilidade de aplicação do modelo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCIDES, F. R. Aspectos que influenciam o planejamento nas empresas florestais. **Dissertação (mestrado)**. Universidade Federal de Viçosa, 28 fev. 2013.

ALTOÉ, F. E. História e evolução da colheita florestal no Brasil. **Monografia**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 16 jul. 2008.

ALVES, R. T. Análise técnica e de custos do transporte florestal rodoviário. **Dissertação (mestrado)**. Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.

ALVES, P. G. L.; ZANUNCIO, J. C. Manejo integrado de pragas florestais. In: LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C. (Org.). **Novo Manual de Pragas Florestais Brasileiras**. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **CERNE**, v. 21, p. 649–656, dez. 2015.

BETTINGER, P. et al. Forest management and planning. **Academic press**, 2016.

BORGES, P.; BERGSENG, E.; EID, T. Adjacency constraints in forestry - A simulated annealing approach comparing different candidate solution generators. **Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences**, v. 6, p. 11–25, 30 mar. 2014.

CASTRO, N. L. M. DE. Inovações na otimização do talhamento e microplanejamento da extração florestal. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Viçosa, 31 ago. 2018.

GEORGIN, J. et al. Inventário florestal quantitativo em plantio de pinus elliottii no município de ronda alta, rs. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 228-236, 2015.

GONÇALVES, J. C.; SCARPIN, C. T. Otimização do Planejamento da Colheita Florestal: comparações entre restrições ARM e URM. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 9, n. 1, 8 dez. 2022.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Efeito das restrições espaciais de adjacência no planejamento florestal otimizado. **Revista Floresta**, 2010.

GOMIDE, L. R. Planejamento florestal espacial. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Paraná, 3 jun. 2013.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Comparação entre a meta-heurística simulated annealing e a programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 449–460, jun. 2013.

IEDE, E. T.; PENTEADO, S. DO R. C.; REIS FILHO, W. Manejo integrado de pragas em plantios florestais. In: **ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA**, 3., 2014, Campinas. Anais... Curitiba: Malinovski, 2014.

KAŠPAR, J.; MARUŠÁK, R.; BETTINGER, P. Time Efficiency of Selected Types of Adjacency Constraints in Solving Unit Restriction Models. **Forests**, v. 7, n. 5, p. 102, maio 2016.

KRONEMBERGER, D. M. P. Os desafios da construção dos indicadores ODS globais. **Ciência e Cultura**, v. 71, n. 1, p. 40–45, jan. 2019.

LIMA, N. ESG e os novos tempos das certificações florestais. **Sociedade de Investigações Florestais**. 15 de jun. de 2022. Disponível em: < <https://sif.org.br/2022/05/esg-e-os-novos-tempos-das-certificacoes-florestais>>. Acesso em: 17 de março de 2024.

MACHADO, S. do A.; URBANO, E.; DA CONCEIÇÃO, M. B. Comparação de métodos de estimativa de volume para *Pinus oocarpa* em diferentes idades e diferente regimes de desbastes. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 50, p. 81-81, 2005.

MACHADO, C. C. **Planejamento e controle de custos na exploração florestal**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 1984.

MARTINI, E. L.; LEITE, N. B. Planejamento florestal, a importância e a aplicação da programação linear. **Encontro Brasileiro de Economia Florestal**, v. 1, p. 545-574, 1988.

MARTINS, T. V. et al. Mosaicos clonais de eucalyptus no planejamento florestal e seus efeitos econômicos e produtivos. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, 1 dez. 2017.

MATOS, L. M. A. et al. Influência dos parâmetros da metaheurística algoritmo genético em um problema de planejamento florestal. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 4, p. 767–774, 30 dez. 2019.

MATOS, L. M. A. et al. Uma revisão crítica das ferramentas de pesquisa operacional aplicada ao planejamento florestal nos periódicos brasileiros. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 2035–2055, 14 mar. 2022.

MCNAUGHTON, A.; RÖNNQVIST, M.; RYAN, D. The Scheduling of Forest Harvesting with Adjacency Constraints. 17 set. 1998.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Sistema Nacional de Informações Florestais**. Florestas Plantadas. Disponível em:<<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-plantadas>>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

MUTZ, A. P. M. G. Meta-heurística híbrida de algoritmo genético e algoritmo vagalume para otimização do problema da colheita florestal. **Monografia**. Instituto Federal do Espírito Santo, 2022.

NARDELLI, A. M. B. Sistemas de certificação e visão de sustentabilidade no setor florestal brasileiro. **Tese (Doutorado em Ciência Florestal)**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

OLIVEIRA, S. F. DE. Práticas ESG: incorporação de critérios ambientais em projetos minerários. **Monografia**. Universidade Federal de Minas Gerais, 11 abr. 2022.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, 31 dez. 2010.

PECORA, G. et al. **Sistemas de informação geográfica (SIG) como ferramenta para a otimização da exploração florestal em regiões montanhosas**. VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas: innovar y producir para el futuro. Libro de actas, 2014, ISBN 978-84-695-9055-3, págs. 1534-1539. **Anais...** Em: VII CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA Y CIENCIAS HORTÍCOLAS: INNOVAR Y PRODUCIR PARA EL FUTURO. LIBRO DE ACTAS. Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid, 2014. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7483313>>. Acesso em: 18 jan. 2024

PENNA, G. P. C. et al. Adesão aos objetivos do desenvolvimento sustentável (ods) pelas empresas brasileiras. **Latin American Journal of Business Management**, v. 13, n. 2, 30 dez. 2022.

SFEIR, T.; ARCE, J.; FIGUEIREDO FILHO, A. Considerações sobre o uso de restrições ambientais de adjacência no setor florestal. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 34, 30 dez. 2020.

SOUSA, R. A. T. de M. Análise do fluxo de transporte rodoviário de toras curtas de eucalipto para algumas indústrias de celulose e de chapas de composição no estado de São Paulo. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo, 2000.

SILVA, José Natalino Macedo. Manejo florestal. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Belém, PA: EMBRAPA-SILVA, B. C. et al. Métodos de controle e prevenção de insetos-praga em povoamentos florestais / Methods of pest insect control and prevention in forest stands. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 48477–48496, 20 jul. 2020.

STEIGUER, J. E. DE et al. Multi-criteria decision models for forestry and natural resources management: an annotated bibliography. **Gen. Tech. Rep. NE-307. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 32 p.**, v. 307, 2003.

RÍOS-MERCADO, R. Z. et al. An Extended Unit Restriction Model with Environmental Considerations for Forest Harvesting. **Forests**, v. 14, n. 4, p. 788, abr. 2023.

ROCHA, E. B. DA et al. Produtividade e custos de um sistema de colheita de árvores inteiras. **CERNE**, v. 15, n. 3, p. 372-381, 2009.

RODRIGUES, A. R. et al. Forest management for optimizing soil protection: a landscape-level approach. **Forest Ecosystems**, v. 8, n. 1, p. 50, 16 jul. 2021.

HOMPSON, W. A. et al. Using forest fire hazard modelling in multiple use forest management planning. **Forest Ecology and Management**, v. 134, n. 1, p. 163–176, 1 set. 2000.

VASCONCELOS, K. C. D. A.; SILVA JUNIOR, A. D. Learning sustainability in the harvesting practices of a forest-based company. **RAM. Revista de Administração Mackenzie**, v. 22, n. 5, p. eRAMG210198, 2021.

ZEGARRA, B. E. V. Caracterização da estrutura anatômica e da densidade do lenho de árvores de *Pinus taeda* e efeito nas propriedades tecnológicas dos painéis OSB. **Dissertação(mestrado)**. Universidade de São Paulo, 4 nov. 2011.