

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA

CARLOS EURICO GALVÃO ROSA

PROPOSTA DE INTEGRAR OPERAÇÃO DE COLHEITA FLORESTAL COM
OTIMIZAÇÃO VIÁRIA

CURITIBA

2022

CARLOS EURICO GALVÃO ROSA

PROPOSTA DE INTEGRAR OPERAÇÃO DE COLHEITA FLORESTAL COM
OTIMIZAÇÃO VIÁRIA

Projeto de Qualificação apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch
Coorientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

CURITIBA

2022

TERMO DE APROVAÇÃO

CARLOS EURICO GALVÃO ROSA

PROPOSTA DE INTEGRAR OPERAÇÃO DE COLHEITA FLORESTAL COM OTIMIZAÇÃO VIÁRIA

Projeto de Qualificação apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch
Orientador

Prof. Dr. Julio Eduardo Arce
Avaliador

Profa. Dra. Linamara Smaniotto Ferrari
Avaliadora

Prof. Dr. Thiago André Guimarães
Avaliador

**Prof. Dr. Cleder Marcos
Schenekemburg**
Avaliador (Suplente)

Curitiba
2022

*Para Márcia, Marcos, Paloma
e especialmente Dorival Aparecido Rosa (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

A todos que, em maior ou menor grau, colaboraram para a realização deste trabalho.

“Ut in omnibus glorificetur Deus”

RESUMO

O setor florestal contribui com cerca de 1% de todo o PIB Nacional e, semelhante a outros setores, busca sempre inovar e aprimorar suas práticas a fim de obter melhores resultados dentro das restrições inerentes às suas operações. Além disso, no atual contexto global existe a necessidade de tornar a gestão florestal cada vez mais sustentável. Uma das práticas de manejo florestal sustentável é o agendamento de colheita dos talhões, onde cada talhão deverá ser colhido na época mais favorável dentro do horizonte de planejamento, considerando as áreas já colhidas no entorno. O objetivo deste trabalho é propor um modelo que realize o agendamento da colheita florestal de modo integrado às necessidades de abertura ou manutenção de estradas e comparação desta solução integrada com modelo que trate separadamente os casos.

Palavras-chaves: Agendamento de colheita florestal, Malha viária, Otimização

ABSTRACT

The forestry sector contributes about 1% of the entire National GDP and, similar to other sectors, always seeks to innovate and improve its practices in order to obtain better results within the constraints inherent to its operations. In addition, in the current global context there is a need to make forest management increasingly sustainable. One of the sustainable forest management practices is the harvesting schedule of stands, where each plot should be harvested at the most favorable time within the planning horizon, considering the areas already harvested in the surroundings. The objective of this work is to propose a model that performs the scheduling of forest harvesting in an integrated way to the needs of opening or maintenance of roads and comparison of this integrated solution with a model that treats cases separately.

Key-words: Forest harvesting scheduling, Road network, Optimization

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Níveis organizacionais e Horizontes de Planejamento associados	12
FIGURA 2 – Conceito tradicional do Processo Administrativo	13
FIGURA 3 – Exemplo de floresta ilustrando o Relatório 2020 da IBÁ	17
FIGURA 4 – Exemplo de rede viária de acesso à talhões	18
FIGURA 5 – Possíveis cenários de colheita de talhões próximos	20
FIGURA 6 – Resultados quantitativos da RSL	22
FIGURA 7 – Mapa gerado da base Kittanning4 com dados do grafo. Fonte: Autor	34
FIGURA 8 – Representações simplificadas para teste. Fonte: Autor	34
FIGURA 9 – Base Kittanning4, Solução Parcial. Fonte: Autor	37

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Proposta: Conjuntos Primários	25
TABELA 2 – Proposta: Conjuntos Secundários	25

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

CARP	Problema de Roteamento em Arcos Capacitados
HP	Horizonte de Planejamento
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PCARP	Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados
PCARP-FH	Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados para Colheita Florestal
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
PO	Pesquisa Operacional
SFB	Serviço Florestal Brasileiro

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos específicos	16
1.2 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA	16
1.3 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	17
2.1 GESTÃO FLORESTAL	17
2.1.1 Planejamento Hierárquico Florestal	17
2.1.2 Agendamento e Colheita	19
2.2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO PERIÓDICO EM ARCOS CAPACITADOS PARA COLHEITA FLORESTAL - PCARP-FH	20
3 REVISÃO DE LITERATURA	22
4 PROPOSTA	25
4.1 MODELO MATEMÁTICO	25
4.1.1 Detalhamentos	32
4.1.1.1 Restrições envolvendo criação de blocos	32
5 RESULTADOS INICIAIS	33
5.1 DADOS DE TESTE	33
5.2 IMPLANTAÇÃO	34
5.2.1 Particularidades aplicadas na implantação	36
5.3 FRAGILIDADES CONHECIDAS	37
Considerações	39
REFERÊNCIAS	40
ANEXOS	45
ANEXO A ARTIGO EM PROCESSO DE SUBMISSÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	46

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, com sua área de 8.510.295,914 km² segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) IBGE (2020), tem quase 60% de seu território em florestas conforme o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) (BRASIL, 2019), sendo 4.880.669,46 km² (57,31% da área total) em florestas naturais e 98.396,86 km² (1,16% da área total) em florestas plantadas. O setor florestal, atuante majoritariamente na área correspondente às florestas plantadas, gera mais de 500 mil empregos diretos com Produto Interno Bruto de R\$ 97,4 bilhões, de acordo com o relatório 2020 (dados de 2019) da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), associação representativa de empresas da cadeia produtiva de árvores plantadas (IBÁ, 2020).

Toda essa produção é afetada por uma série de restrições tanto de ordem legislativa quanto inerentes ao próprio contexto de cultivo e produção florestal e necessita ser bem planejado. A exploração de uma área florestal pode ser considerada, por analogia, com uma organização a ser administrada ou um empreendimento a ser executado. Com isso, conceitos próprios da administração, como níveis organizacionais e processo administrativo, cabem perfeitamente ao contexto. Os níveis organizacionais nos quais se desdobra o empreendimento, bem como seu respectivo Horizonte de Planejamento (HP), são ilustrados na figura 1.

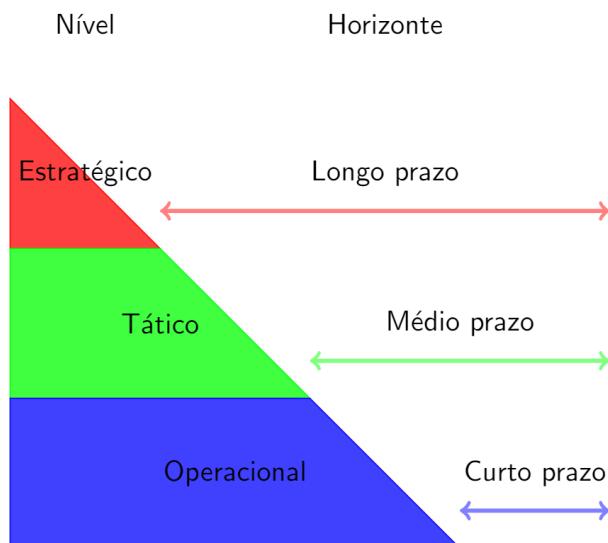


FIGURA 1 – Níveis organizacionais e Horizontes de Planejamento associados

Fonte: O autor

Planejar, conforme Chiavenato (2011), é uma das etapas do processo de administrar uma organização, em um conceito mais geral, como mostra a Figura 2.

O planejamento é conceituado por Bateman e Snell (2012) como “o processo consciente e sistemático de tomada de decisões sobre metas e atividades que uma

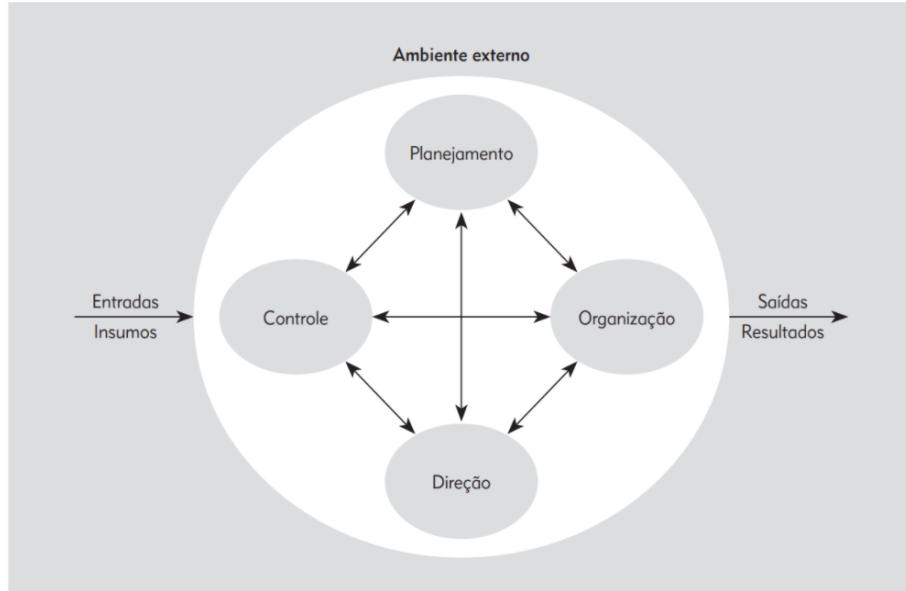


FIGURA 2 – Conceito tradicional do Processo Administrativo

Fonte: Chiavenato (2011, p.14)

pessoa, um grupo, uma unidade, ou uma empresa tentará realizar no futuro". As metas são os objetivos a serem alcançados e os planos são as atividades concorrentes para atingir as metas. A cada nível organizacional é associado um planejamento próprio. Com isso temos a especificação do planejamento em:

- Estratégico: Ligado à alta administração do empreendimento, com HP de longo prazo;
- Tático: Baseado no Planejamento Estratégico, sendo mais específico, com HP de médio prazo. Relacionado à administração intermediária;
- Operacional: Baseado em resultados do Planejamento Tático, com HP de curto prazo, definindo atividades de rotina da linha de frente.

No contexto florestal, Martell et al. (1998) recordam a importância do planejamento estratégico na gestão florestal desde o Séc. XIX considerado "essência da silvicultura tradicional europeia" na referida época. Ainda segundo Martell et al. (1998) a busca pela maximização do volume colhido foi substituída por uma gestão florestal sustentável. Enquanto veem suas demandas crescentes tanto para produtos madeireiros, produtos não madeireiros e serviços não consumíveis como recreação, espaços de plantio restritos, existem pressões e restrições vindas de grupos de interesse. Desta forma, já é um grande desafio dos profissionais do ramo florestal encontrar soluções factíveis para o problema, mesmo que nem sejam ótimas (MARTELL et al., 1998). A utilização da Pesquisa Operacional (PO) tem a capacidade de auxiliar os planejadores em encontrar soluções que satisfaçam as diversas restrições e, ainda, minimizando ou maximizando uma função objetivo.

A interpretação de Banhara (2009) da estratificação do planejamento para a gestão florestal, com base em diversos trabalhos por ele citados, traz as seguintes características:

- O Planejamento Estratégico Florestal trabalha com um HP de um ciclo florestal e meio, algo entre 15 e 21 anos no Brasil. Neste nível são “apresentadas as alternativas de manejo, os volumes a serem gerados e os talhões disponíveis para cada operação florestal em cada ano”(BANHARA, 2009) e outras necessidades.
- No Planejamento Tático Florestal são estabelecidas metas mensais e HP em torno de um a cinco anos. Banhara (2009) menciona a possível subdivisão deste planejamento em microplanejamento e macroplanejamento. Este trata o talhão como unidade de manejo, definindo, entre outras atividades, “sequenciamento da operação de colheita e transporte, [...], estabelecer melhoria ou ampliação da malha viária, [...]”(BANHARA, 2009) que são ações ligadas ao presente estudo. Já No microplanejamento, as ações estabelecidas são internas ao talhão.
- Por fim, no Planejamento Operacional Florestal são tratadas decisões semanais, com HP de um ano, como escolha de época de colheita, alocação de equipes e recursos, além de desenvolver, coordenar e executar mecanismos de aferição do progresso dos trabalhos, a fim de alcançar as metas estabelecidas.

O manejo florestal, parte essencial do Planejamento estratégico, é definido na Lei de Gestão de Florestas Públicas, como:

“administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras, de múltiplos produtos e subprodutos não madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços de natureza florestal.” (BRASIL, 2006b, Lei 11.284/2006, Art.3º, inciso VI)

Para tal gestão é preciso estar atento à estas restrições, buscando sempre obter o melhor aproveitamento dentro destes limites, seguindo o Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) a ser elaborado conforme o Decreto 5.975/2006 (BRASIL, 2006a). A análise de D'Arace et al. (2019) chega a conclusão que o uso de técnicas de manejo contribui para “mitigar os impactos da exploração florestal” analisando recrutamento e mortalidade de árvores, que D'Arace et al. (2019) chamam de “indivíduos”. Um ponto a ressaltar desta análise, considerando o exemplo prático analisado no mesmo trabalho, é o impacto causado pelas estradas secundárias na probabilidade dessa mortalidade. Isso se dá pois um mau planejamento do acesso a um determinado local pode colocar em risco o desenvolvimento de árvores que estejam próximas do trajeto, inviabilizando sua futura colheita.

Para analisar o uso e manutenção de estradas, somos remetidos ao Problema de Roteamento em Arcos Capacitados (CARP). Tomando um Grafo(V, A) no qual V , o conjunto de vértices, representa pontos que precisam ser atendidos por veículos e A , conjunto de arestas, as rotas que ligam estes vértices, o CARP tem por objetivo estabelecer rotas mínimas que atendam a todas as demandas do arco de acordo com as capacidades de atendimento da frota disponível. O CARP é acrescido de restrições específicas caso esse atendimento ocorra com periodicidade superior a um dia, passando a ser conhecido como Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados (PCARP) e aumentando sua complexidade segundo Batista et al. (2019). Essa abordagem é comum para problemas de coleta de lixo, limpeza de ruas devido à neve ou, como apresentado por Batista et al. (2019), manutenção periódica em estradas de ferro dentre outros casos semelhantes, nos quais há demanda ao longo de todo um arco do grafo.

Consideradas tais situações, a presente tese busca contribuir com a melhoria dos cenários de manejo resolvendo uma variante do PCARP aqui denominada de Problema de Roteamento Periódico em Arcos Capacitados para Colheita Florestal (PCARP-FH). Nesse aspecto, temos um fator do Planejamento Estratégico, que seria a construção da rede viária florestal para todo o HP, podendo considerar fatores dos planejamentos tático e operacional. A definição do sequenciamento de colheita dos talhões no HP (do Planejamento Tático) também leva em conta as necessidades de manutenção da malha viária com as restrições do PCARP. Espera-se que o uso da malha viária de forma inteligente possa minimizar a necessidade de manutenção ocasionada por longos períodos de desuso. O modelo PCARP-FH, resultante desta união, tem como base os modelos de Correa et al. (2020) nas restrições ligadas ao agendamento e sequenciamento da colheita e Batista et al. (2019) nas restrições do PCARP.

1.1 OBJETIVOS

São estabelecidos como objetivos desta tese:

1.1.1 Objetivo Geral

Apresentar proposta de agendamento em colheita florestal considerando o PCARP-FH de modo a otimizar tanto o processo de colheita quanto o uso e manutenção das estradas de acesso aos talhões, atentando tanto para restrições ligadas ao sequenciamento da colheita quanto para a coleta e transporte dos sortimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Criar e validar modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) do agendamento de colheita;
- Criar e validar modelo PLIM do PCARP, sendo os vértices do grafo os talhões e os segmentos da malha viária entre talhões as arestas;
- Fazer a adaptação dos dois modelos em fase única, o PCARP-FH, incorporando o PCARP ao modelo do agendamento.

1.2 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA

1.3 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente tese se estrutura da seguinte forma: No capítulo 2 é feita uma descrição do problema de agendamento da colheita florestal. Segue uma revisão de literatura com trabalhos relacionados a obtenção de solução para o problema, seja com modelos matemáticos ou heurísticos, no capítulo 3. É apresentada uma proposta de solução do problema no capítulo 4, com resultados obtidos expostos no capítulo 5.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Como visto no Capítulo 1, o planejamento é fundamental para a boa exploração da área, inclusive no cumprimento de exigências legais. Nas seguintes seções, são abordados alguns tópicos que são relacionados ao tema desta tese, dando uma contextualização geral do problema do estudo e da proposta de solução.

2.1 GESTÃO FLORESTAL

Produtos florestais fazem parte do nosso dia-a-dia, muitas vezes de formas que nem percebemos. Desde itens facilmente associados à madeira como papel (embalagens, livros, papéis sanitários), carvão vegetal, móveis e pisos laminados, passando por resinas, tintas, aromatizantes, até inovações tecnológicas da indústria da madeira como roupas, bioplásticos e aço verde (resultante do uso de biomassa na fundição do ferro gusa, reduzindo assim emissão de CO₂ em relação à fundição tradicional). A simples extração madeireira, sem cuidados com o replantio e o planejamento, além de contrariar a legislação vigente, é diretamente prejudicial ao próprio extrator, por exaurir rapidamente os recursos que lhe são disponíveis sem perspectiva para futuras colheitas no mesmo local, não aproveitar ao máximo o material colhido – por eventuais perdas causadas pela falta de planejamento – e exigir elevado investimento futuro, possivelmente ligado a aquisição de novas áreas nem sempre disponíveis.



FIGURA 3 – Exemplo de floresta ilustrando o Relatório 2020 da IBÁ
Fonte: IBÁ (2020)

2.1.1 Planejamento Hierárquico Florestal

Como descrito no capítulo 1, há um paralelo entre a gestão de um empreendimento florestal e de uma organização, aplicando o conceito de níveis organizacionais no Planejamento Florestal. Recordando Banhara (2009), o Planejamento Estratégico

tem um HP maior que o ciclo florestal, o Planejamento Tático se baseia em um HP de alguns anos e o Operacional foca em HP anual. As decisões estratégicas tem metas anuais, as táticas tem metas mensais e as operacionais metas semanais. Para o bom funcionamento do empreendimento todos estes níveis “precisam trabalhar em uníssono e em total integração” (CHIAVENATO, 2011) e os planejamentos “devem ser coerentes, sustentar-se mutuamente e focar a consecução de um propósito e uma orientação comuns” (BATEMAN; SNELL, 2012).

Banhara (2009), baseando-se em alguns trabalhos, descreve pontos importantes do planejamento florestal em seus diversos níveis. No planejamento estratégico são tratadas questões relativas ao manejo, volume produzido, disponibilidade dos talhões, aquisições, arrendamentos, etc. Tomando como exemplo a figura 4, nesta etapa são definidos quais serão os talhões a serem colhidos em cada período e os meios de acesso. A proposta da presente tese se encaixa inicialmente nesta fase, onde ocorre a definição da malha viária a ser utilizada para atender às demandas de cada talhão. Esta malha pode ser pré-existente, construída de uma só vez ou construída de acordo com a necessidade.



FIGURA 4 – Exemplo de rede viária de acesso à talhões

Fonte: o autor, com dados da base PhyllisLeeper Details

Para o planejamento tático, Banhara (2009) ressalta as restrições ligadas à temas ambientais e físicos intrínsecos à operação. Na separação deste plano em macroplanejamento e microplanejamento, ficam as questões externas ao talhão no macroplanejamento e as internas no microplanejamento. Assim a sequência de talhões a serem colhidos, o acesso a esses talhões e os equipamentos a serem usados na operação, dentre outros, são atinentes ao macroplanejamento, ficando para o

microplanejamento temas como os eixos de corte, a forma de retirar a madeira do talhão, áreas de corte proibidas, etc. Novamente a presente tese tem interseção, ao buscar o agendamento das colheitas considerando a malha viária existente, com sua capacidade.

No planejamento operacional, as ações abrangem alocação de equipes, definição de épocas de colheita, gerenciamento do transporte, além da aferição do andamento das metas estabelecidas. Considera-se que a proposta da presente tese não tenha ligação direta com este planejamento, embora informações dos planejamentos de nível inferior contribuam com as decisões a serem tomadas nos níveis superiores.

2.1.2 Agendamento e Colheita

Como descrito no planejamento tático, é preciso definir o conjunto de talhões a serem colhidos em cada período, dentro do HP. Sobre essa escolha recaem questões ambientais, logísticas e de produtividade. A colheita de muitos talhões adjacentes prejudica a biodiversidade local, retirando a possibilidade que espécimes da vida selvagem habitantes do talhão a ser colhido possam se abrigar em um local próximo não operado. Por outro lado, uma colheita menor resulta em uma menor produtividade, que pode vir a não atender à demanda especificada do período. Com isso é preciso designar a colheita de dois talhões que sejam o mais próximos possível, a fim de minimizar os custos operacionais, mas que sejam suficientemente distantes para minimizar o impacto ambiental. É nesse sentido que são estabelecidas as restrições que envolvem estabelecimentos de áreas mínimas e máximas para colheita em área contígua, bem como do distanciamento entre talhões a serem colhidos.

Como não há relação determinística entre os mencionados limites de área para colheita e a área individual de cada talhão, é possível considerar a formação dos chamados blocos de colheita, que funcionam como um *cluster* de talhões. Partimos do pressuposto que sempre haverá um bloco de colheita inicial. Após o bloco inicial, novos blocos serão criados sempre que o volume previsto para colheita for insuficiente para atender à demanda máxima esperada do período, considerada uma tolerância nesse valor. Caso o primeiro bloco formado já atenda toda a demanda, ao menos este foi criado validando o pressuposto acima. Desse modo, a soma das áreas dos talhões colhidos dentro de um determinado bloco deverá respeitar os limites estabelecidos de áreas mínimas e máximas de colheita, contanto que dois talhões de um mesmo bloco só serão colhidos se estiverem a uma distância maior que um mínimo pré determinado, mas não tão longe que onere a operação.

Outra questão ambiental levantada nesse tópico envolve a colheita de talhões próximos dentro do intervalo de tempo da operação. Não adianta apenas não colher

talhões adjacentes no mesmo período, devido à distância já mencionada, mas efetuar a colheita em período imediatamente posterior, sem tempo para que a vegetação do talhão colhido possa se recuperar. Nesse sentido, são impostas restrições que impedem que um talhões adjacentes sejam colhidos em um curto espaço de tempo. Também deve ser respeitada a idade de cada talhão, a fim de evitar colheitas prematuras que não geram a melhor receita possível naquele espaço. A figura 5 ilustra três cenários de desenvolvimento de dois talhões adjacentes, numerados com referência aos períodos de operação. Em todos exemplos o talhão mais desenvolvido é colhido no segundo período. A diferenciação dos cenários está na colheita do outro talhão: No cenário 1, os talhões adjacentes são colhidos no mesmo período; No cenário 2, os talhões adjacentes são colhidos em períodos subsequentes e; No cenário 3, há um intervalo entre a colheita dos talhões adjacentes. Nota-se nos dois primeiros cenários que, ao colher a área contígua sem respeitar um período de recomposição da floresta, a área mais exposta diminui a possibilidade de refúgio à biodiversidade local.

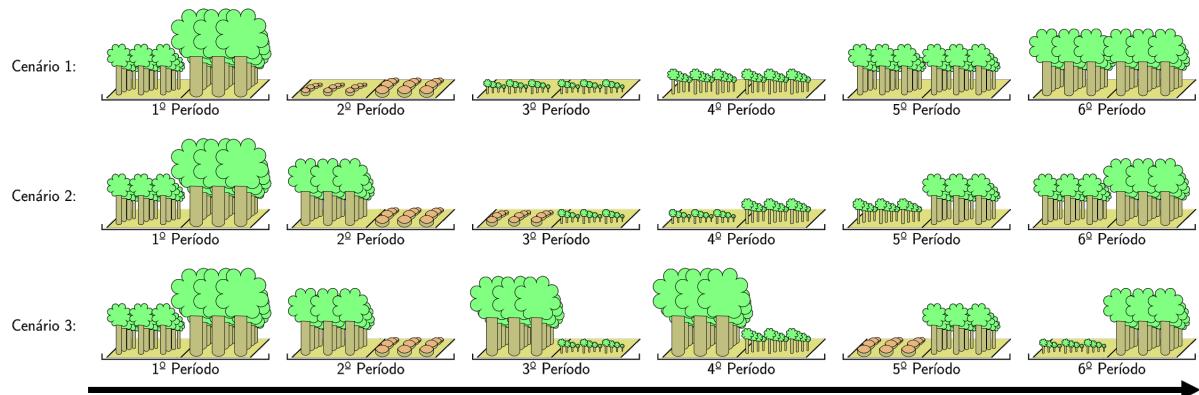


FIGURA 5 – Possíveis cenários de colheita de talhões próximos

Fonte: O Autor

2.2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO PERIÓDICO EM ARCOS CAPACITADOS PARA COLHEITA FLORESTAL - PCARP-FH

No problema em tela temos um conjunto de talhões no agendamento, correspondentes a vértices, que serão colhidos dentro de um determinado bloco e período. As rotas de acesso a estes talhões são nossas arestas, que tem uma capacidade de uso. Além dos talhões, existem pontos do mapeamento por onde os veículos precisam passar que não são necessariamente locais de colheita, mas possíveis interseções de estradas e o próprio ponto de saída da rede viária florestal, que também podem ser contados como vértices. Estas características formam um grafo (V, A) no qual pode se aplicar o PCARP, sendo definidas as rotas de atendimento dos talhões. O incremento do PCARP, passando a PCARP-FH, será requerida manutenção/abertura de rota de acesso ao talhão no período $p - 1$ se ele estiver agendado para colheita no período p . Uma rota será requerida quando um talhão for colhido, seja entre talhões ou entre um

talhão e outro nó do grafo que não seja talhão. Naturalmente haverá tráfego entre os talhões i, j se um deles for colhido e o outro estiver na rota entre o talhão colhido e o ponto de transbordo ou saída. É preciso observar a capacidade de carga do veículo e a viabilidade de que um caminhão sem capacidade completa colete material de outro talhão que esteja em sua rota o que, apesar de ser incomum, pode ser testado para fins de melhor uso da frota. Essa viabilidade se verifica ao comparar os custos entre um mesmo veículo atender dois talhões com o custo de dois veículos distintos atenderem talhões distintos sem uso de sua capacidade máxima.

O custo de manutenção de um arco será impactado pela necessidade de abertura desse arco e, caso já esteja aberto, o tempo de desuso, supondo que isso cause acúmulo de entulhos (resíduos, crescimento de mato) e encareça sua manutenção. Por outro lado, não faz jus manter um arco que não terá utilização próxima. Pode ser testada, para fins teóricos, a abertura de novos arcos entre os talhões. Entretanto, pesa contra essa possibilidade a necessidade de minimizar a quantidade de estradas, pois cada área destinada a tráfego é uma área a menos disponível para plantio, além de não levarmos em conta aspectos topográficos para ligações inexistentes. Devido a isso, nesta pesquisa trabalha-se com as ligações já existentes entre talhões, deixando essa abordagem com criação de novas ligações para uma análise tridimensional.

São dados necessários para estudo do problema: A quantidade de talhões; A demanda por período; As áreas mínimas e máximas de colheita; A distância mínima para colheitas em um mesmo bloco; A distância mínima para colheitas em períodos consecutivos; A malha viária existente; O custo estimado de manutenção dos trechos da malha viária; A capacidade de tráfego da malha. Espera-se da resposta do modelo: Os talhões a serem colhidos por período e a melhor rota para atender esses talhões.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Com o objetivo de fundamentar a presente pesquisa, foi executada uma revisão sistemática de literatura, da qual se originou artigo reproduzido no apêndice A. Como já mencionado, a revisão seguiu as orientações de Kitchenham (2004) com auxílio do programa *StArt*. Neste paradigma, são previstas as seguintes etapas: Planejamento, Execução e Sumarização.

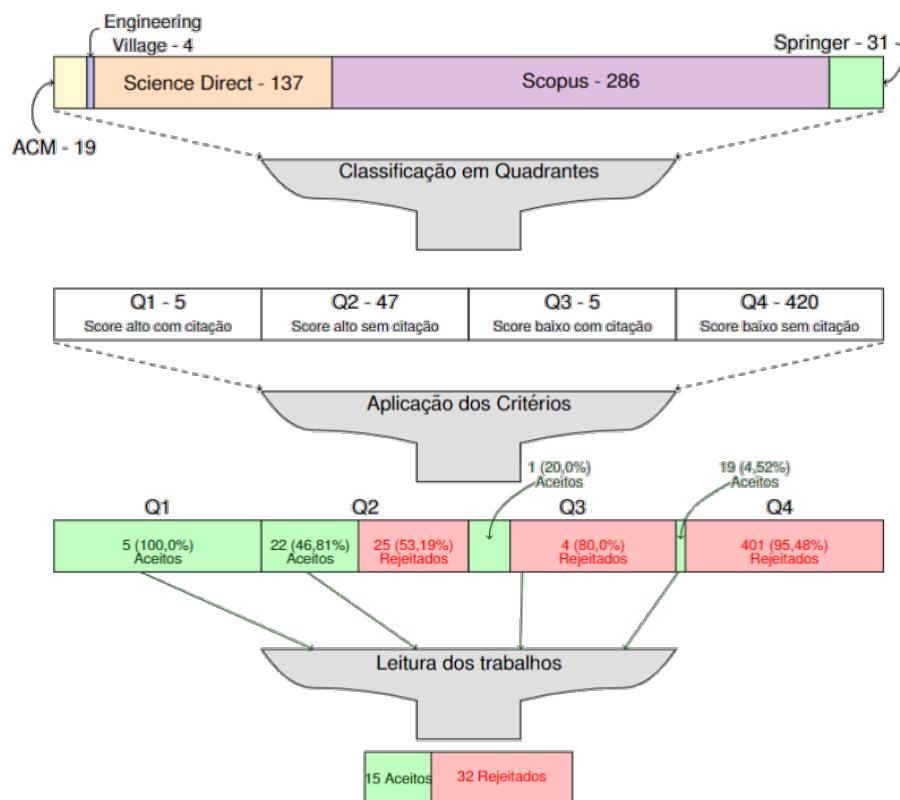


FIGURA 6 – Resultados quantitativos da RSL

Fonte: O Autor

No planejamento são definidos os rumos da revisão. Inicia-se com as questões a serem respondidas pelo trabalho, indicando qual é o problema que a pesquisa pretende propôr uma intervenção em prol da melhoria naquela área de estudo. Segue-se com as definições de critérios para os trabalhos que serão utilizados, as palavras-chave relativas ao tema que possivelmente estarão presentes em trabalhos relevantes e os idiomas das publicações que serão considerados válidos no âmbito da busca. Posteriormente são estabelecidas as estratégias de busca, definindo os motores de busca utilizados bem como suas características. Aos trabalhos retornados pelas buscas, são aplicados critérios de inclusão e exclusão com o objetivo de destacar os trabalhos realmente interessantes para proposição de respostas às questões estabelecidas. Finalizando o protocolo é descrita a etapa de extração das informações, com perguntas

a serem consideradas na leitura dos trabalhos e contribuirão com o entendimento do tema. A figura 6 apresenta o fluxo de seleção dos trabalhos, ilustrando a etapa de execução e os quantitativos de trabalhos inclusos.

Seguem considerações dos trabalhos por ano de publicação. De 2017, Fiorentin et al. (2017) propõem estratégias buscando regular os volumes máximos e mínimos colhidos durante um período anual de forma a padronizar as colheitas ao longo do HP. Kašpar et al. (2017) apresentam uma otimização para eliminar fatores de incertezas nas decisões tomadas no processo de agendamento da colheita florestal. São propostos dois modelos: um determinístico que maximiza o volume colhido por talhão; outro robusto fará a mesma maximização incorporando restrições relativas à incertezas. Pradenas-Rojas e Passicot-Guzmán (2017) exibem um problema PLIM minimizando o custo total de transporte alocando guindastes e utilizando caminhões de transporte de toras de forma otimizada.

Passando para 2018, Dong et al. (2018) aplicam a metaheurística *Simulated Annealing* no agendamento da colheita florestal, sem consideração de rotas e transportes. Ross et al. (2018) aperfeiçoam o que denominam Problema Endógeno de Carga Fixa (“*Endogenous Fixed Charge Problem - EFCP*”), uma variante do Problema Clássico de Carga Fixa, de forma a superar o problema do EFCP de não abordar a natureza endógena da estrutura de custos. Esse aperfeiçoamento é denominado Modelo Exógeno de Carga Fixa (“*Exogenous Fixed Charge Model - EFCM*”). São otimizadas as necessidades de abertura e/ou manutenção de estradas da malha viária do empreendimento florestal. Yoshimoto e Asante (2018) compararam duas abordagens de otimização, chamadas “BK-Model I” e “PT-Model I” para problemas de colheita florestal com restrições espaciais, por meio de restrições de fluxo.

Seguindo para 2019, Álvarez-Miranda et al. (2019) elaboram um modelo estocástico de gestão florestal abrangendo cronograma de colheita e abertura de estradas de acordo com critérios econômicos, de sustentabilidade, condições de mercado, crescimento florestal e demandas espaciais do caso de estudo. Este modelo multicritério “permite que gestores tenham não apenas uma, mas um conjunto de políticas de planejamento de longo prazo” (ÁLVAREZ-MIRANDA et al., 2019). Santos et al. (2019) apresentam modelo matemático para minimizar os custos da operação florestal considerando movimentação e transporte dos materiais. Søvde et al. (2019) desenvolve modelo que permite calcular caminhos mais curtos com grande número de parâmetros, usando a heurística *Variable Neighborhood Search (VNS)* para obtenção de melhores resultados. Na linha do agendamento de colheita florestal, Stang et al. (2019) sugere modelo PLI para o sequenciamento anual das operações de colheitas em blocos trabalhando com corte raso. Finalizando com 2020, Bellaventte et al. (2020) utiliza heurísticas do tipo *k-opt* para clusterizar e quebrar um problema de agendamento de

colheita florestal de larga escala em subproblemas, resolvendo estes com PLIM no solver Gurobi. MONTI et al. (2020) criam um modelo de otimização do transporte florestal comparando a quantidade real média de madeira carregada/transportada por dia com a possível quantidade de madeira que poderia ser transportada, avaliando assim a eficácia do modelo. Naderizadeh e Crowe (2020) enfatiza a importância da integração entre colheita e transporte do material no planejamento. Sua abordagem comparar as soluções integrando rotas e colheitas com soluções apenas com colheitas, sem integração. Simonenkova et al. (2020) divide a otimização do leiaute da malha viária em três etapas: Inicia sem clusterização, passa a fazer uma clusterização com base nos resultados anteriores e termina otimizando toda a colheita baseando-se nas etapas anteriores. Deixam indicado a integração das três etapas como “interessante”. EKER e SESSIONS (2020) utiliza PL para planejamento das operações anuais de um caso específico, minimizando custos das atividades levando em conta o corte, a extração e o transporte. Nos casos em que a PL não chega a uma solução ótima, o problema passa a ser abordado com heurísticas.

4 PROPOSTA

Tendo em vista a descrição apresentada no capítulo 2, apresenta-se aqui a proposta hibridizada.

4.1 MODELO MATEMÁTICO

A seguinte proposta se inicia com os conjuntos listados na tabela 1:

Conjuntos	Descrição	Índice	Cardinalidade
N	Conjunto de nós do grafo	i, j	$ N $
P	Conjunto de períodos do HP	p	$ P $
S	Conjunto de sortimentos	s	$ S $
B	Conjunto de todos os possíveis blocos a serem criados	b, h	$ B $

TABELA 1 – Proposta: Conjuntos Primários

Como subconjuntos dos anteriormente listados, temos os conjuntos secundários

Conjuntos	Descrição	Derivação
F	Conjunto de talhões da floresta, necessariamente nós do grafo	$\subset N$
P_p	Períodos do HP anteriores ao período p , se existirem, sem incluí-lo	$\subset P$
B_p	Conjunto de possíveis blocos no período p	$\subset B$

TABELA 2 – Proposta: Conjuntos Secundários

No planejamento florestal de médio prazo com restrições operacionais de transporte tem-se que talhões $i \in F$ disponíveis para colheita e são conhecidos:

- a_i Área do talhão i
- os volumes de material v_{isp} de cada sortimento $s \in S$ no período $p \in P$ do horizonte de planejamento (HP),
- n_i a idade do talhão i no início do HP,
- η_i a idade mínima de colheita do talhão i ,
- o VPL v_{sp} de cada sortimento s no período p ,
- a lista de talhões adjacentes a ele A_i ,
- as distâncias médias δ_{ij} para os talhões j adjacentes e

- ε_{ip} número de viagens para atender i se colhido no período p .

Para cada um dos períodos existe

- d_{sp} demanda necessária com uma tolerância σ ;
- \bar{A}_p Área máxima permitida para a formação de um bloco de colheita;
- \underline{A}_p Área mínima necessária para a formação de um bloco de colheita.

Para que seja possível a colheita nos talhões faz-se necessária a abertura/manutenção de estrada e tem-se

- κ_{ijp} o custo para abertura de estrada de i para j no período p , obtido pelo produto do custo de abertura por unidade de distância pelo comprimento da estrada mais algum custo fixo inerente à operação
- μ_{ijp} o custo para manter aberta uma estrada que estava aberta no período anterior, de modo semelhante ao parâmetro κ_{ijp} .

Além disso, tem-se que considerar a contratação de transportadora para realizar o transporte entre os talhões e a fábrica, de forma que o contrato é composto por

- g_p : custo por viagem realizada (custo de carregamento e descarregamento),
- φ_{ij} : custo do deslocamento por viagem percorrida de i para j ,

No contexto dos blocos de colheita, temos

- Δ_b : Distância máxima em número de arcos que um talhão pode ficar de outro talhão no mesmo período e mesmo bloco
- Δ_p : Distância máxima em número de arcos que um talhão pode ficar de outro talhão quando selecionados no mesmo período, mas em blocos diferentes
- Δ_c : Distância máxima em número de arcos que um bloco pode ficar de outro bloco de períodos consecutivos;
- τ : Percentual mínima de abertura de um novo bloco para um dado período.

Desta forma, sobre decisões de colheita e disponibilidade de estrada tem-se as variáveis de decisão binárias

- x_{ipb} indicando se a colheita do talhão i é realizada no período p no bloco de colheita b ou não
- α_{pb} se o bloco b for gerado no período p
- w_{ijp} se é *aberta* a estrada ligando os vértices i e j no período p
- z_{ijp} se é *mantida* a estrada ligando os vértices i e j no período p
- y_{ijp} se está *disponível* a estrada ligando os vértices i e j no período p

Para o transporte, a variável inteira de decisão é

- u_{ijp} : quantidade de viagens realizadas entre os vértices i e j no período p

$$\begin{aligned} \max Z = & \sum_{i \in F} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{b \in B_p} v_{isp} v_{sp} x_{ipb} \\ & - \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{p \in P} (\kappa_{ijp} w_{ijp} + \mu_{ijp} z_{ijp} + \varphi_{ij} u_{ijp}) \\ & - \sum_{i \in F} \sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \varepsilon_{ip} g_p x_{ipb} \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

Detalhando os somatórios:

- $\sum_{i \in F} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{b \in B_p} v_{isp} v_{sp} x_{ipb}$: Soma da receita bruta obtida em todos os talhões, sortimentos, períodos e blocos. O volume por produto colhido de cada talhão é multiplicado pelo valor do produto no período de colheita.
- $\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{p \in P} \kappa_{ijp} w_{ijp}$: Custo de abertura de estradas
- $\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{p \in P} \mu_{ijp} z_{ijp}$: Custo de manutenção de estradas
- $\sum_{i \in F} \sum_{j \in F} \sum_{p \in P} \varphi_{ij} u_{ijp}$: Custo de todas as viagens realizadas
- $\sum_{i \in F} \sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \varepsilon_{ip} g_p x_{ipb}$: Custo de carga/descarga

Sujeito a

Abertura/Manutenção de estrada

$$z_{ijp} \leq \sum_{p'=1}^{p-1} w_{ijp'} \quad \forall i, j \in N, \forall p \in P \quad (4.1.2)$$

Leitura (4.1.2): Uma estrada só poderá ser mantida no período p se tiver sido aberta em algum período anterior a p .

$$z_{ijp} \leq \sum_{p' \in P_p} (w_{ijp'} + z_{ijp'}) \quad \forall i, j \in N, \forall p > 2 \in P_p \quad (4.1.3)$$

Leitura (4.1.3): Uma estrada não pode ser mantida se não tiver sido aberta ou mantida em período anterior específico. Caso uma estrada não tenha sido aberta e nem recebido manutenção em um intervalo de períodos específico (P_p) anterior, ela é considerada fechada.

$$w_{ijp} + z_{ijp} \leq 1 \quad \forall i, j \in N, \forall p \in P, \quad (4.1.4)$$

Leitura (4.1.4): Uma estrada não pode receber manutenção no mesmo período que tiver sido aberta.

$$y_{ijp} \leq w_{ijp} + z_{ijp} \quad \forall i, j \in N, \forall p \in P, \quad (4.1.5)$$

Leitura (4.1.5): Uma estrada não está disponível pra uso se não tiver sido aberta ou recebido manutenção no período.

$$y_{ijp} \leq u_{ijp} \quad \forall i, j \in N, \forall p \in P, \quad (4.1.6)$$

Leitura (4.1.6): Uma estrada não precisa estar disponível se não houver viagens nela.

$$\sum_{b \in B} x_{ipb} \leq \sum_{j \in N} y_{ijp} \quad \forall i \in F, \forall p \in P, \quad (4.1.7)$$

Leitura (4.1.7): Um talhão colhido precisa que ao menos uma estrada de acesso ao talhão esteja disponível, não importando a que tipo de vértice do grafo essa estrada se conecta.

Fluxo de veículos

$$\sum_{j \in N} u_{jip} + \varepsilon_{ip} \left(\sum_{b \in B} x_{ipb} \right) = \sum_{j \in N} u_{ijp} \quad \begin{aligned} & \forall i \in N, \\ & \forall p \in P \end{aligned} \quad (4.1.8)$$

Leitura (4.1.8): O número de viagens que saem do vértice i deve ser o número de viagens que chegam no vértice acrescido da quantidade de viagens necessária para atender o volume colhido caso o vértice seja um talhão.

Colheita

$$\sum_{b \in B} \sum_{p \in P} x_{ipb} \leq 1 \quad \forall i \in F \quad (4.1.9)$$

Leitura (4.1.9): Cada talhão pode ser colhido, no máximo, uma vez.

$$x_{i11} = 1 \quad \forall i \in F_1 \quad (4.1.10)$$

Leitura (4.1.10): Os talhões do conjunto F_1 precisam ser colhidos no primeiro período.

$$(n_i + p - 1)x_{ipb} \geq \eta_i x_{ipb} \quad \begin{aligned} & \forall i \in F, \forall p \in P, \\ & \forall b \in B_p \end{aligned} \quad (4.1.11)$$

Leitura (4.1.11): Um talhão só é colhido se tiver idade igual ou superior à mínima η_i .

Volume de Colheita

$$\sum_{b \in B} \sum_{i \in F} v_{isp} x_{ipb} \geq (1 - \sigma) d_{sp} \quad \forall s \in S, \forall p \in P \quad (4.1.12)$$

Leitura (4.1.12): Para cada sortimento s e cada período p , a soma dos volumes colhidos nos blocos precisa atender a demanda d_{sp} , com uma tolerância σ .

$$\sum_{b \in B} \sum_{i \in F} v_{isp} x_{ipb} \leq (1 + \sigma) d_{sp} \quad \forall s \in S, \forall p \in P \quad (4.1.13)$$

Leitura (4.1.13): Para cada sortimento s e cada período p , a soma dos volumes colhidos nos blocos não deve extrapolar a demanda d_{sp} , com uma tolerância σ .

Área colheita

$$\sum_{i \in F} a_i x_{ipb} \leq \bar{A}_p \alpha_{pb} \quad \forall p \in P, \forall b \in B_p \quad (4.1.14)$$

Leitura (4.1.14): A área colhida em todos os talhões do período deve ser inferior à área máxima de colheita para o período p , se o bloco foi criado, ou zero caso contrário.

$$\sum_{i \in F} a_i x_{ipb} \geq \underline{A}_p \alpha_{pb} \quad \forall p \in P, \forall b \in B_p \quad (4.1.15)$$

Leitura (4.1.15): A área colhida em todos os talhões do período deve superar a área mínima de colheita para o período p , se o bloco foi criado, ou zero caso contrário.

Criação de blocos

$$\alpha_{p1} = 1 \quad \forall p \in P \quad (4.1.16)$$

Leitura (4.1.16): Para todo período, um primeiro bloco deve ser criado.

$$\begin{aligned} \alpha_{pb} &\leq \frac{1}{\tau} \left(\frac{(1 + \sigma) d_{sp} - \sum_{h=1}^{b-1} \sum_{i \in F} v_{isp} x_{iph}}{(1 + \sigma) d_{sp}} \right) \\ &\forall s \in S, \forall p \in P, b = 2, \dots, |B| \end{aligned} \quad (4.1.17)$$

ou equivalentemente

$$\sum_{h=1}^{b-1} \sum_{i \in F} v_{isp} x_{iph} \leq (1 - \tau \alpha_{pb})(1 + \sigma) trd_{sp} \quad \forall s \in S, \forall p \in P, b = 2, \dots, |B|$$

Leitura (4.1.17): Blocos Seguintes são criados caso haja demanda, de acordo com a fórmula. Se o volume previsto até o bloco $b - 1$, mais um percentual da demanda máxima com tolerância extrapolar essa demanda máxima, o bloco b não é criado.

Distâncias entre blocos colhidos

$$\delta_{ij} (x_{ipb} + x_{jpb} - 1) \leq \Delta_b \quad \begin{aligned} &\forall i \in F, \forall j > i \in F, \\ &\forall p \in P, \forall b \in B_p \end{aligned} \quad (4.1.18)$$

Leitura (4.1.18): Dois talhões só podem ser colhidos em um mesmo bloco se a distância entre eles for menor que Δ_b .

$$\begin{aligned} \delta_{ij} (X_{ipb} + X_{jph} - 1) &\leq \Delta_a & \forall i \in F, \forall j > i \in F, \\ && \forall p \in P, \forall b, h \in B_p, \\ && h \neq b \end{aligned} \quad (4.1.19)$$

Leitura (4.1.19): Dois talhões só podem ser colhidos em blocos distintos e um mesmo período se a distância entre eles for menor que Δ_a .

$$\begin{aligned} X_{ipb} + X_{jph} &\leq 1 & \forall i \in F, \forall j \in A_i, \\ && \forall p \in P, \forall b \in B_p, \\ && h = b + 1, \dots, |B| \end{aligned} \quad (4.1.20)$$

Leitura (4.1.20): Talhões adjacentes não podem ser colhidos em um mesmo período.

$$\begin{aligned} X_{ipb} + X_{j(p+1)h} &\leq 1 & \forall i \in F, \forall j \in A_i, \\ && \forall b \in B_p, \forall h \in B_p, \\ && p = 1, \dots, HP - 1 \end{aligned} \quad (4.1.21)$$

Leitura (4.1.21): Talhões adjacentes não podem ser colhidos em períodos consecutivos.

$$\begin{aligned} \delta_{ij} (X_{ipb} + X_{j(p+1)h}) &\leq 2\Delta_c & \forall i, j \in F, \\ && \forall b \in B_p, \forall h \in B_p, \\ && p = 1, \dots, HP - 1 \end{aligned} \quad (4.1.22)$$

Leitura (4.1.22): Dois talhões quaisquer só podem ser colhidos em períodos consecutivos se estiverem em uma distância inferior (ou, no máximo, igual) ao dobro de Δ_c .

Tipos de variáveis

$$X_{ipb}, \alpha_{pb}, W_{ijp}, Z_{ijp}, Y_{ijp} \in \{0, 1\} \quad \begin{aligned} \forall i, j \in N, \\ \forall b \in B, \forall p \in P \end{aligned} \quad (4.1.23)$$

Leitura (4.1.23): Variáveis binárias.

$$U_{ijp} \in N \quad \forall i, j \in N, \forall p \in P \quad (4.1.24)$$

Leitura (4.1.24): Variáveis naturais.

Na função objetivo (4.1.1) o resultado líquido é obtido da receita bruta auferida em todos os talhões, sortimentos, períodos e blocos descontados os custos de abertura

e manutenção de estradas, das viagens realizadas e cargas e descargas dos veículos. Atendem a questões de abertura e manutenção de estrada as restrições 4.1.2 a 4.1.7. O grupo de restrições 4.1.8 lida com o fluxo de veículos nos talhões. Para o processo de colheita, volume colhido, área de colheita e criação de blocos de colheita estão propostas as restrições de 4.1.9 a 4.1.22, sendo as últimas apenas para indicar os tipos de variáveis. A distância considerada nas restrições 4.1.18, 4.1.19 e 4.1.22 depende dos respectivos parâmetros Δ_b , Δ_a e Δ_c , podendo ser a distância real entre os talhões ou pela quantidade de arestas da trajetória entre os talhões considerando a malha viária como grafo.

4.1.1 Detalhamentos

São apresentados aqui alguns apontamentos sobre o desenvolvimento de algumas restrições menos intuitivas.

4.1.1.1 Restrições envolvendo criação de blocos

A variável α_{pb} está atrelada a duas situações: A área colhida e o volume colhido em relação à demanda. Pela restrição 4.1.14, não ocorre a colheita de nenhum talhão no período p bloco b sem que $\alpha_{pb} = 1$. Da mesma restrição, a soma de todas as áreas dos talhões colhidos no período p bloco b não supera a área máxima de colheita prevista para aquele período p . Por sua vez, a restrição 4.1.15 exige que haja alguma colheita no período p bloco b quando $\alpha_{pb} = 1$. O objetivo de ambas consiste em atender ao modelo ARM.

Já a permissão de criação de novos blocos é regida pelas restrições 4.1.17 e 4.1.18. Em todo período, um primeiro bloco é criado pela restrição 4.1.17. Os blocos seguintes terão sua criação dependente do volume prévio, isto é, já colhido em blocos anteriores e dado por $\sum_{h=1}^{b-1} \sum_{i \in F} v_{isp} x_{iph}$. O fator $(1 + \sigma)d_{sp}$ representa o volume esperado a ser colhido do sortimento s , acrescido de uma tolerância σ . Já o fator $(1 - \tau\alpha_{pb})$ modula a permissão de criar ou não o novo bloco. Ao definir $\tau = 0.3$, por exemplo, se o volume prévio não supera 70% da demanda com tolerância, tanto $\alpha_{pb} = 0$ quanto $\alpha_{pb} = 1$ satisfazem a restrição 4.1.17. Caso contrário, o volume prévio está próximo do esperado, acima de $(1 - \tau) \cdot 100\%$, e não se permite a criação de um novo bloco.

5 RESULTADOS INICIAIS

Apresentada a proposta no capítulo anterior, seguem-se resultados iniciais, modo de programação e estratégias para verificação dos algoritmos.

5.1 DADOS DE TESTE

Para validar a presente proposta, são utilizados os dados da base Kittaning4 (TOTH, 2011), com adaptações para a definição das estradas. A base se refere a um empreendimento de 32 polígonos (talhões) e 588 hectares na Pensilvânia, EUA. Consiste nos arquivos

- Description_Kittaning4.doc contendo a lista dos arquivos de extensão .csv da base e suas descrições
- Adjacency_Kittaning4.csv: lista de talhões adjacentes, isto é, talhões com fronteira comum.
- Stands_Kittaning4.csv: Para cada talhão são listados área em acres e idade em décadas.
- Volume_Kittaning4.csv: Projeção de volume a ser colhido em cada talhão nos próximos 50 anos. A unidade volumétrica de medida são "1000 board feet", o que equivale aproximadamente a 2,36m³. Não há categorização por sortimentos nesta base.
- Profit_Kittaning4.csv: Os lucros obtidos em cada talhão caso haja colheita nos períodos do HP ou caso não seja colhido.
- Diretório Map_Kittaning4 contendo os arquivos Kittaning.dbf, Kittaning.prj, Kittaning.shp, Kittaning.shp.xml e Kittaning.shx

A partir dos dados do diretório Map_Kittaning4 foi possível construir a imagem 7 com o software QGIS Desktop 3.20.3.

As distâncias entre os nós do grafo são calculadas a partir do algoritmo de Floyd-Warshall. Porém, a base original não apresenta dados de malha viária, sendo arbitradas ligações entre estes talhões e pontos auxiliares no grafo para contribuir com o fluxo do volume colhido em direção ao ponto de saída da malha viária, como ilustrado na figura 7.

Com base nos dados da Kittaning4 foram criados outros três conjuntos menores de dados usados para verificação do funcionamento do modelo e testes que causassem

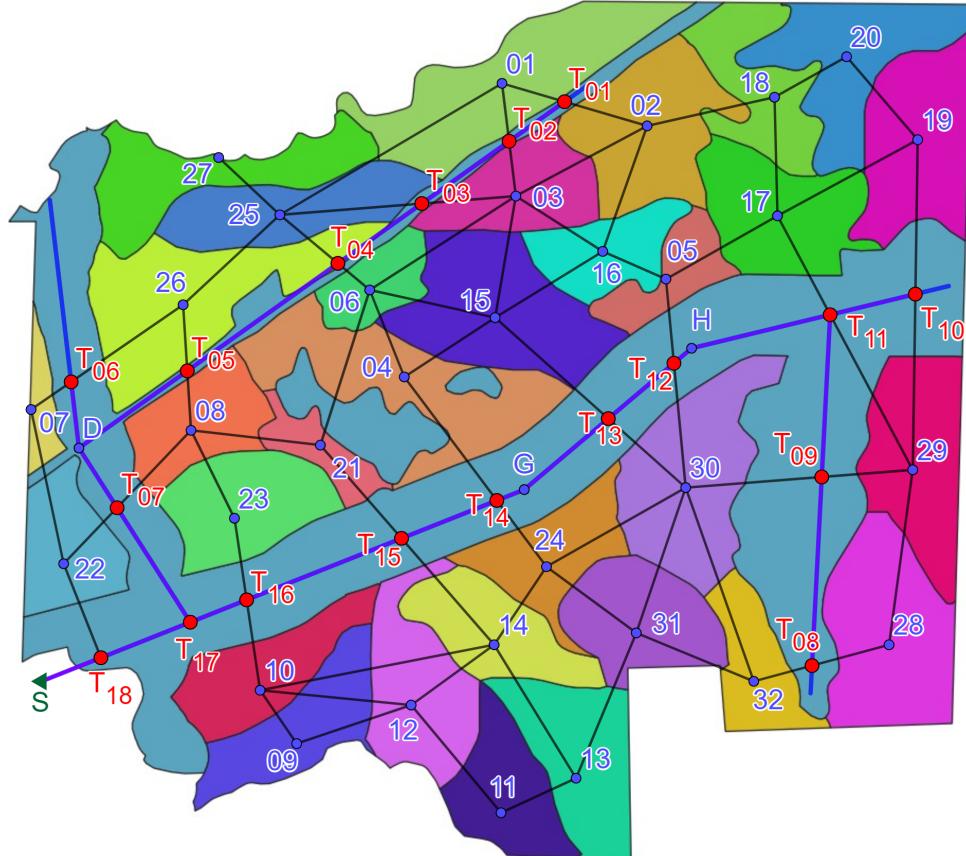


FIGURA 7 – Mapa gerado da base Kittanning4 com dados do grafo.
Fonte: Autor

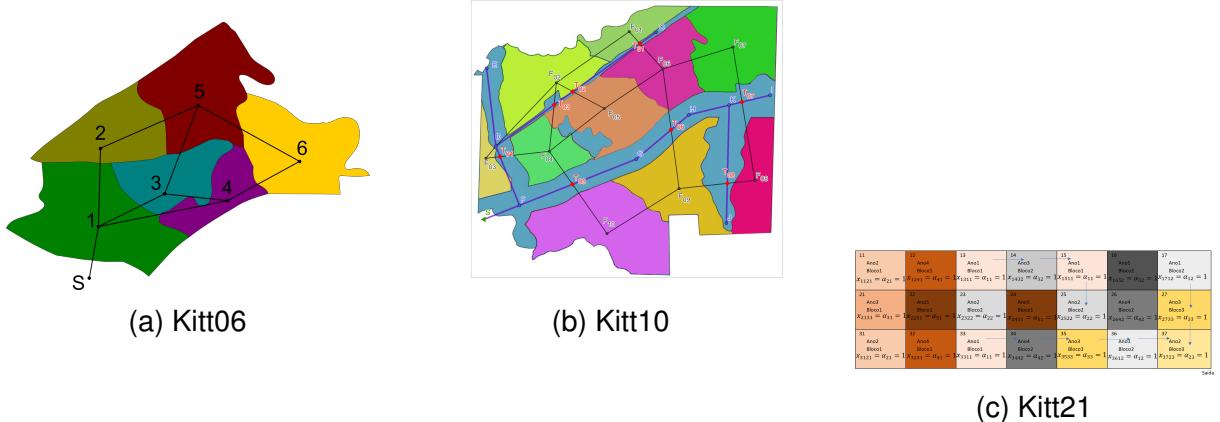


FIGURA 8 – Representações simplificadas para teste.

Fonte: Autor

menor impacto computacional na avaliação. Foram chamados de “Kitt06”, “Kitt10” e “Kitt21”, respectivamente com seis, dez e vinte e um talhões.

5.2 IMPLANTAÇÃO

A implantação computacional do problema é feita na linguagem C#, no ambiente Visual Studio®2022, otimizador Gurobi 9.5.2 em computador equipado com

processador AMD Ryzen 3 5400U @ 2.60 GHz e 8 Gb de RAM. Como estratégia de criação do modelo e reutilização de código, foram colocadas funções próprias para cada grupo de restrições, sendo que a função específica de criação de módulos pode ser chamada de três modos:

- Modo híbrido (hyb): No qual são acionadas as restrições da malha viária e do agendamento florestal, retornando a solução ótima;
- Modo Apenas Agendamento da Colheita (HSO): Apenas as restrições de agendamento são consideradas, gerando um agendamento otimizado sem levar em conta a rede viária;
- Modo Malha Viária (VRP): Para ativar esse modo, é preciso informar os valores obtidos no modo anterior para que a otimização da malha viária seja feita com a resposta otimizada do agendamento.

Este modo de organizar permite que o mesmo código seja utilizado tanto para a solução híbrida quanto para a solução em fases, sem repetição de programação nem risco de programações distintas para comparação.

Para esta implantação, algumas modificações nos arquivos lidos foram necessárias, a fim de incluir os pontos no grafo que não são da base original, as estradas arbitradas e os custos destas estradas. Assim, a base de arquivos usada para estes testes consiste dos arquivos, lidos nesta ordem:

- Kitt4_pts_grafo.csv: Com a posição de cada centróide no grafo e classificação se esse ponto é referente a um talhão ou ponto auxiliar;
- Kitt4_std_grafo.csv: reprodução de Stands_Kittaning4.csv, com área e idade;
- Kitt4_adj_grafo.csv: reprodução de Adjacency_Kittaning4.csv;
- Kitt4_edg_grafo.csv: arestas arbitradas para o teste, com distâncias, custos e informação de pré-existência;
- Kitt4_vol_grafo.csv: reprodução de Volume_Kittaning4.csv;
- Kitt4_prf_grafo.csv: reprodução de Profit_Kittaning4.csv;
- Kitt4_rod_grafo.csv: parâmetros da malha viária, a saber:
 - MaintenanceOpeningPeriods: Período máximo sem manutenção de uma estrada para considerá-la fechada (tamanho dos conjuntos P_p);
 - Cost_RoadOpening_ByUnity: Custo da abertura de uma estrada por unidade de comprimento;

- Cost_RoadMaintenance_ByUnity: Custo da manutenção de uma estrada por unidade de comprimento;
- Cost_TravelFix_ByUnity: Custo fixo para realização de uma viagem, independente do tamanho do percurso;
- Cost_TravelsIJ_ByUnity: Custo para a viagem por unidade de comprimento da via (combustível, desgaste veicular, entre outros)
- Cost_TravelFix_ByPeriod: Custo fixo para viagem, variável de acordo com o período (carga/descarga - g_p);
- Cost_RoadMaintenance_ByPeriod: Custo de manutenção de estradas, variável por período do HP;
- Cost_RoadOpening_ByPeriod: Fator de variação do custo de manutenção por período do HP;

Considerando os parâmetros do modelo, temos:

- κ_{ijp} associado à função CalcCost_RoadOpening, formada por distância entre os talhões i e j vezes Cost_RoadOpening_ByUnity vezes Cost_RoadOpening_ByPeriod[p]
- μ_{ijp} associado à função CalcCost_RoadMaintenance, formada por distância entre os talhões i e j vezes Cost_RoadMaintenance_ByUnity mais Cost_RoadMaintenance_ByPeriod[p];
- φ_{ijp} associado à função CalcCost_TravelsIJ, formada por distância entre os talhões i e j vezes Cost_TravelsIJ_ByUnity mais Cost_TravelFix_ByUnity.

5.2.1 Particularidades aplicadas na implantação

Para a viabilidade do grafo, todas as execuções contaram com uma restrição extra evitando que variáveis w_{ijp} , Z_{ijp} , y_{ijp} e u_{ijp} tivessem valor 1 nos casos em que $i = j$, evitando estradas que saiam e cheguem no mesmo ponto.

O total de períodos do *HP* é sempre considerado com uma unidade extra, sendo o “período zero”. Os talhões indicados para colheita neste “período zero” são, de fato, talhões que não serão colhidos no planejamento. Já em relação às estradas, considera-se que não sejam feitas manutenções no “período zero”, obrigando pela abertura da estrada em seu primeiro acesso. Estradas pré-existentes podem ser consideradas como “abertas no período zero” sem custo, devendo esta informação constar nos parâmetros informados.

Na restrição 4.1.11, foi implementado um teste para que apenas restrições onde a idade atual do talhão fosse menor que a idade mínima fossem incluídas no

modelo. Assim, restrições que apareciam apenas como “ ≥ 0 ” ou “ $x_{ipb} \geq 0$ ficam de fora, por já serem atendidas pelas próprias definições da variável x_{ipb} .

Para bom atendimento das restrições 4.1.8, constatou-se que o vértice do grafo correspondente à saída da malha viária não poderia ser submetido à essa restrição. Para tanto, a respectiva classe recebeu um atributo booleano “*IsExit*”, indicando os nós aos quais não se aplica esse grupo de restrições.

Na execução considerou-se como talhão pertencente ao primeiro grupo de colheita aqueles que estiverem com idade inicial superior a 75% da maior idade inicial dentre os talhões disponíveis. A implementação computacional e os testes encontram-se em andamento. O código C# em desenvolvimento está acessível em <https://github.com/cegalvao/FHModel>.

5.3 FRAGILIDADES CONHECIDAS

O grupo de restrições 4.1.6 obriga que estradas não usadas ($u_{ijp} = 0$) não devem estar disponíveis ($y_{ijp} = 0$), mas não obriga que estejam disponíveis ao serem usadas. A obrigação de estar disponível é ligada por outras restrições, mas as primeiras soluções apresentam trechos usados ($u_{ijp} > 0$) sem que a estrada esteja disponível ($y_{ijp} = 0$).

Já o grupo de restrições 4.1.22 tem gerado infactibilidade nas resoluções, mesmo com uso do recurso de “*lazy constraints*” do solver. Nos últimos testes as distâncias consideradas são pelo número de arestas do grafo na trajetória.

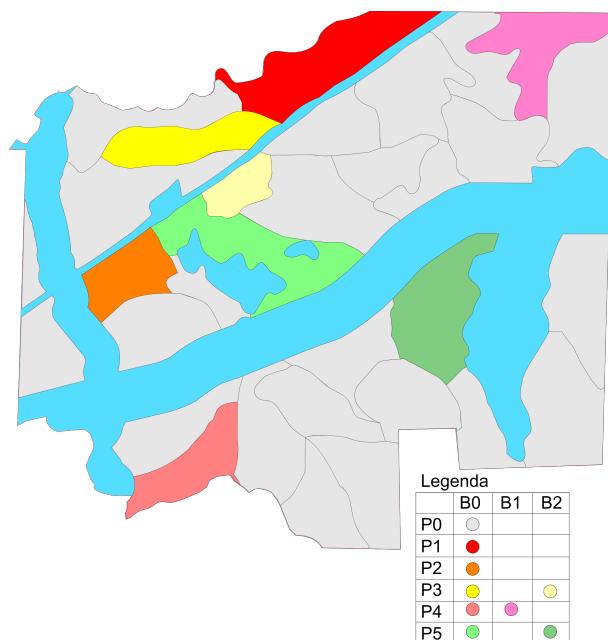


FIGURA 9 – Base Kittanning4, Solução Parcial.
Fonte: Autor

Nas soluções atualmente obtidas, a maior parte dos talhões não é colhida, conforme 9. Ainda há os casos dos períodos 3 e 5 em que há formação de um segundo bloco de colheita sem nenhum talhão atribuído ao primeiro bloco.

Como o modelo híbrido ainda não apresenta resultado satisfatório, dadas as fragilidades aqui apontadas, ainda falta a implementação da resolução em forma separada (primeiro agendamento, depois distribuição da malha viária) para comparação.

CONSIDERAÇÕES

REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ-MIRANDA, E.; GARCIA-GONZALO, J.; PAIS, C.; WEINTRAUB, A. A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty. English. **Forest Policy and Economics**, v. 103, p. 112–122, 2019. DOI: [10.1016/j.forepol.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.forepol.2018.03.006). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85045295789&doi=10.1016%5C%2fj.forepol.2018.03.006&partnerID=40&md5=0526640b32d76a21> Citado 2 vez na página 23.
- BANHARA, J. R. **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático**. Jun. 2009. Diss. (Mestrado) – USP - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP. DOI: [10.11606/D.11.2009.tde-05082009-074058](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-05082009-074058). Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-05082009-074058/pt-br.php>. Citado 7 vezes nas páginas 14, 17, 18.
- BATEMAN, T. S.; SNELL, S. A. **Administração**. 2. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. ISBN 0078137233. Citado 2 vezes nas páginas 12, 18.
- BATISTA, G. V.; SCARPIN, C. T.; PÉCORA, J. E.; RUIZ, A. A New Ant Colony Optimization Algorithm to Solve the Periodic Capacitated Arc Routing Problem with Continuous Moves. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2019, p. 3201656, jul. 2019. ISSN 1024-123X. DOI: [10.1155/2019/3201656](https://doi.org/10.1155/2019/3201656). Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/3201656>. Citado 3 vez na página 15.
- 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**, Canadian Science Publishing, v. 50, n. 8, p. 811–818, 8 ago. 2020. ISSN 12086037. DOI: [10.1139/cjfr-2019-0425](https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0425). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088892573&doi=10.1139%5C%2fcjfr-2019-0425&partnerID=40&md5=98aafda3d000972637a2c5b65b889707>. Citado 1 vez na página 23.
- BRASIL. Decreto nº5.975 de 30 de novembro de 2006. **Diário Oficial da União** – Seção 1, Brasília, 2006. Disponível em:

<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=1&data=01/12/2006&tipo=1>
Citado 1 vez na página 14.

BRASIL. Lei de Gestão de Florestas Públicas. Lei nº11.284 de 02 de março de 2006. **Diário Oficial da União** – Seção 1, Brasília, 2006. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=1&data=03/03/2006&tipo=1>
Citado 1 vez na página 14.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas do Brasil em resumo: 2019**. Brasília: MAPA/SFB, 2019. ISBN 978-85-7991-128-6. Citado 1 vez na página 12.

CHIAVENATO, I. **Administração para não administradores: a gestão de negócios ao alcance de todos**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2011. ISBN 978-85-204-4176-3.
Citado 2 vezes nas páginas 12, 13, 18.

CORREA, R. N.; SCARPIN, C. T.; FERRARI, L. S.; ARCE, J. E. Application of relax-and-fix heuristic in the aggregation of stands for tactical forest scheduling. **Forest Policy and Economics**, Elsevier, v. 119, p. 102284, 2020. ISSN 1389-9341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102284>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934120302136>. Citado 1 vez na página 15.

D'ARACE, L. M. B.; SILVA, L. D.; GOMES, J. M.; COSTA, N. S. L.; SILVA CASSEB, B. da; SANTOS, M. L. dos; ROCHA, E. S. da; NAZARÉ MARTINS MACIEL, M. de; FREITAS, L. J. M. de. O manejo florestal como estratégia para mitigar os impactos da exploração florestal. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 6, p. 32–42, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0004>. Citado 2 vez na página 14.

DONG, L.; BETTINGER, P.; QIN, H.; LIU, Z. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. **Silva Fennica**, Finnish Society of Forest Science, v. 52, n. 1, 1 2018. ISSN 22424075. DOI: [10.14214/sf.7803](https://doi.org/10.14214/sf.7803). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041699315&doi=10.14214%5C%2fsf.7803&partnerID=40&md5=2712be4087d2a374505ba9a9e>
Citado 1 vez na página 23.

EKER, M.; SESSIONS, J. Refocusing on operational harvest planning model for state-owned forestry in Turkey. **European Journal of Forest Engineering**, European Journal of Forest Engineering, v. 6, p. 96–106, 2 dez. 2020. ISSN 21495637. DOI: [10.33904/ejfe.829946](https://doi.org/10.33904/ejfe.829946). Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ejfe/issue/56757/829946>. Citado 1 vez na página 24.

FIORENTIN, L. D.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L.; DAVID, H. C.; SILVA, P. H. B. M. da; STANG, M. B.; FILHO, A. F. Strategies for regulating timber volume in forest stands. **Scientia Forestalis**, Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF), v. 45, n. 116, dez. 2017. DOI: [10.18671/scifor.v45n116.12](https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.12). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041034018&doi=10.18671%5C%2fscifor.v45n116.12&partnerID=40&md5=e113a7f371a4768a9>. Citado 1 vez na página 23.

IBÁ. **Relatório Anual 2020**. [S.I.], 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Citado 1 vezes nas páginas 12, 17.

IBGE, I. **Áreas Territoriais - O que é**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020. Disponível em: https://web.archive.org/web/20201125201741if_/https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municpios.html?=&t=o-que-e. Citado 1 vez na página 12.

KAŠPAR, J.; HLAVATÝ, R.; KUŽELKA, K.; MARUŠÁK, R. The impact of assumed uncertainty on long-term decisions in forest spatial harvest scheduling as a part of sustainable development. **Forests**, MDPI AG, v. 8, n. 9, p. 335, 9 set. 2017. ISSN 1999-4907. DOI: [10.3390/f8090335](https://doi.org/10.3390/f8090335). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85028992404&doi=10.3390%5C%2ff8090335&partnerID=40&md5=4d944d1a87ad5f0d012af1c50>. Citado 1 vez na página 23.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, 2004. Citado 1 vez na página 22.

MARTELL, D. L.; GUNN, E. A.; WEINTRAUB, A. Forest management challenges for operational researchers. **European Journal of Operational Research**, v. 104, n. 1, p. 1–17, 1998. ISSN 0377-2217. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00329-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00329-9). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221797003299>. Citado 3 vez na página 13.

MONTI, C. A.; GOMIDE, L. R.; OLIVEIRA, R. M.; FRANÇA, L. C. Optimization of Wood Supply: The Forestry Routing Optimization Model. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, FapUNIFESP (SciELO), v. 92, n. 3, p. 1–17, 3 nov. 2020. ISSN 0001-3765. DOI: [10.1590/0001-3765202020200263](https://doi.org/10.1590/0001-3765202020200263). Disponível em: <http://www.scielo.br/j/aabc/a/B8fnrrMMdpfzd47JxsjgCxh/?lang=en>. Citado 1 vez na página 24.

NADERIALIZADEH, N.; CROWE, K. A. Formulating the integrated forest harvest-scheduling model to reduce the cost of the road-networks. **Operational Research**, v. 20, 4 2020. DOI: [10.1007/s12351-018-0410-5](https://doi.org/10.1007/s12351-018-0410-5). Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s12351-018-0410-5>. Citado 1 vez na página 24.

PRADENAS-ROJAS, L.; PASSICOT-GUZMÁN, P. Optimizing the use of cranes and trucks in forestry operations. **DYNA**, Universidad Nacional de Colombia, v. 84, n. 201, p. 172–179, 201 jun. 2017. ISSN 00127353. DOI: [10.15446/dyna.v84n201.52739](https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.52739). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85026674084&doi=10.15446%5C%2fdyna.v84n201.52739&partnerID=40&md5=953128910fa8f39>
Citado 1 vez na página 23.

ROSS, K. L.; TÓTH, S. F.; JAROSS, W. S. Forest Harvest Scheduling with Endogenous Road Costs. **Interfaces**, INFORMS Inst.for Operations Res.and the Management Sciences, v. 48, n. 3, p. 260–270, 3 mai. 2018. ISSN 1526551X. DOI: [10.1287/inte.2017.0926](https://doi.org/10.1287/inte.2017.0926). eprint: <https://doi.org/10.1287/inte.2017.0926>.

Disponível em:
<http://pubsonline.informs.org>.
<https://doi.org/10.1287/inte.2017.0926>
<http://www.informs.org>
0001-6736-275X
<http://orcid.org/0000-0002-9004-0406>. Citado 1 vez na
página 23.

SANTOS, P. A. V. H. dos; SILVA, A. C. L. da; ARCE, J. E.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D. A mathematical model for the integrated optimization of harvest and transport scheduling of forest products. **Forests**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 12, p. 1110, 12 dez. 2019. ISSN 1999-4907. DOI: [10.3390/f10121110](https://doi.org/10.3390/f10121110). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079829357&doi=10.3390%5C%2fF10121110&partnerID=40&md5=c30092018667c93de4461d1>

SIMONENKOVA, A.; SIMONENKOV, M.; BACHERIKOV, I. Optimization of forest road network layout problem. In: 1. v. 817. DOI: [10.1088/1757-899X/817/1/012032](https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012032). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85087702388&doi=10.1088%5C%2f1757-899X%5C%2f817%5C%2f1%5C%2f012032&partnerID=40&md5=88b8a6530145e5b2ee8bdd9a29>. Citado 1 vez na página 24.

SØVDE, N. E.; ASTRUP, R.; TALBOT, B. An inverse shortest path approach to find forwarder productivity functions. English. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier B.V., v. 161, p. 53–61, jun. 2019. BigData and DSS in Agriculture. ISSN 01681699. DOI: [10.1016/j.compag.2018.05.023](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.023). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917308335>. Citado 1 vez na página 23.

STANG, M. B.; ARCE, J. E.; AMARAL MACHADO, S. do; BELAVENUTTI, P. H.; FIORENTIN, L. D. Spatial Forest Planning for Optimized Harvest Scheduling. **Floresta e Ambiente**, FapUNIFESP (SciELO), v. 26, n. 1, p. 20160100, 1 fev. 2019. ISSN 1415-0980. DOI: [10.1590/2179-8087.010016](https://doi.org/10.1590/2179-8087.010016). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084231726&doi=10.1590%5C%2f2179-8087.010016&partnerID=40&md5=e15b47aa4244d98fd538141c1de201ac>. Citado 1 vez na página 23.

TOTH, S. **Base Kittaning4 de dados florestais**. [S.I.], 2011. Disponível em: <http://ifmlab.for.unb.ca/fmos/datasets/Kittanning4/>. Citado 1 vez na página 33.

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P. A New Optimization Model for Spatially Constrained Harvest Scheduling under Area Restrictions through Maximum Flow Problem. **Forest Science**, Oxford University Press (OUP), v. 64, n. 4, p. 392–406, 4 abr. 2018. ISSN 0015-749X. DOI: [10.1093/forsci/fxy006](https://doi.org/10.1093/forsci/fxy006). Disponível em: <https://academic.oup.com/forestscience/article/64/4/392/4989365>. Citado 1 vez na página 23.

ANEXOS

**Appendix A – ARTIGO EM PROCESSO DE SUBMISSÃO DA REVISÃO
SISTEMÁTICA DE LITERATURA**

Forest Harvesting and Roads Optimization: A Systematic Review

Carlos Eurico Galvão Rosa*
PPGMNE/UFPR

Curitiba, PR, Brasil
cegalvao@ufpr.br

Gustavo Valentim Loch
PPGMNE/UFPR

Curitiba, PR, Brasil
gustavovalentim@ufpr.br

Cassius Tadeu Scarpin
PPGMNE/UFPR

Curitiba, PR, Brasil
cassiusts@ufpr.br

Abstract—The hierarchical planning of forest management foresees in its stages the scheduling of the harvesting sites and the provision of routes to transport the harvested material, either by drag or cargo vehicles. This systematic literature review seeks to investigate the most used techniques in order to solve these tasks and how the integration of these two steps has been approached to minimize operational costs in the last five years. The importance of research is situated in the potential to reduce the total operating cost with this integration of actions in management compared to the cost in independent planning.

Index Terms—Forest management, Forest road, Optimization

I. INTRODUCTION

The integration of different decision level in the same problem leads to great advantages, once a set of optimal solutions to isolated problems may often be worse than a good solution to the integrated scenario. Although, the limitations due to mathematical algorithms and computational resources often turn it impossible to solve large integrated problems in a single model. Therefore, a common strategy to solve a problem is separate it into smaller problems, simpler than the original one. In the last decades, researches have successfully integrated some levels of forest problems, but we still having interesting gaps to be studied. Analyzing the problems of Forest Harvesting Scheduling, as described by Correa et al. (2020), and Periodic Capacitated Arc Routing Problem, approached by ?, there was interest in researching a possible improvement in forest management considering integrating these areas, promoting forest scheduling with the smallest possible routes, or the best possible usage of the available road network. Here we present a systematic literature review on the theme “Optimization in Forest Harvesting Routes”, with the objective of identifying articles that address route optimization methods in forest harvesting planning published in the last five years to base such a proposal. In order to conduct the literature systematic review, we used the Start software¹, developed based on Kitchenham (2004). The revision proposal is separated into three main stages: Planning, Execution and Synthesis (or Summarization). This paper is organized as follows: The Materials and Methods section presents Planning and the other steps are summarized in the Results and Discussion sections.

* Corresponding author: cegalvao@ufpr.br

¹http://www.lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool. Acessado 14/05/2018

II. MATERIALS AND METHODS

We established as principal question of the review “What methods have been applied to improve forest harvesting with road network optimization?” and our main aim was find articles about forest harvesting with road network optimization and classify ways of resolution of this problems. To answer these questions, we have the following criteria, suggested by Kitchenham (2004):

- Population: group to be observed by the intervention. In this case, scientific productions on route optimization in forest management;
- Intervention: what will be observed in the context of the review. In this case, reading and separation of articles on route optimization;
- Control: initial set already known. In this case, articles with optimization of routes in forest management already owned by researchers before the review;
- Results: what is expected to be obtained in the review. In this case, identify optimization techniques used in the routing of vehicles in forest management, and;
- Applications: areas benefited by the results obtained. In this case, based on the proposition of optimization of routes in forest harvesting.

After search tests, the keywords chosen for scoring and classification of the papers were “Forest Harvest”; “Forest Management”; “Optimization” and “Road network”. Even accepting papers in Portuguese, the usage of English keywords is justified by the practice of publishing abstract papers and keywords in the publishing language and in English, when the primary language is not English. Also about languages, a paper selection filter was the publication having as its primary language English or Portuguese

The search strategy covers the selection of search engines. It was established that the sources should be available via the web, preferably in scientific databases in the area. Thus, the search engines chosen for this review were ACM; Engineering Village; Science Direct; Scopus and Springer, restricting the search only to indexed papers in these search engines.

Continuing the protocol, possible inclusion and exclusion criteria were established. Some studies could even be classified into more than one criterion, but the simple classification in an exclusion criterion was sufficient reason for its definitive

rejection, without entering into the merits of other criteria. Specifically in this classification, we sought to assign the most coherent criterion possible, avoiding the use of more than one criterion for each work. In addition, StArt software offers two tools that contribute to automated job classification: quadrants and scores. According to Octaviano et al. (2015) the score, in the StArt tool, is calculated by the amount of repetitions of search terms in specific parts of the text, such as title, abstract and keywords. The tool displays a window to calibrate the value to be assigned for each meeting of terms, as illustrated in Figure 1.

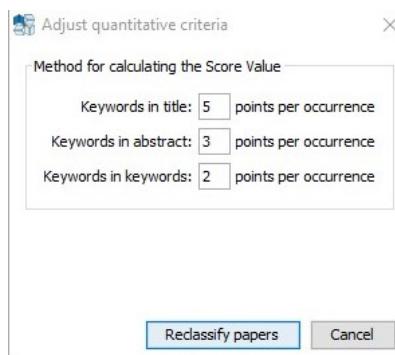


Fig. 1. Quantitative adjustment of criteria
Source: StArt Program Screen

After calculating the scores of each study, they were classified in descending order, considering that higher scores would be linked to more relevant work and lower scores to less relevant work. Thus it was possible to group the works according to the limits of cuts obtained by the techniques "rule of 50%" and "Decision Trees J48", as described by Octaviano et al. (2015), obtaining papers above and below this cutoff limit. A second analysis of the work was done by cross-reference, verifying that the work under analysis is cited by other studies available for analysis, using data mining tools. In this case the grouping is based on the cited papers (with at least one citation) and works not mentioned in the other. With these two processes, four quadrants are established, as shown in Figure 2.

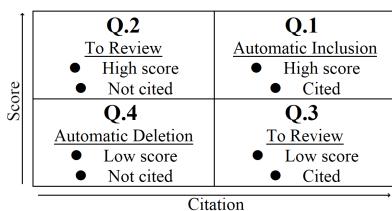


Fig. 2. Classification quadrants
Source: Authors, based on Octaviano et al. (2015)

For all studies we established the following inclusion criteria (IC): IC1) Studies related to the forest management area; IC2) Use route optimization in forest management; IC3) Addresses

routes and loadings in forest management; IC4) Review studies citing other route optimization references in forest management; IC5) Addresses route maintenance/optimization. Exclusion criteria (EC) were: EC1) Papers not fully available through institutional access (paid) in the scientific databases sought; EC2) Papers that do not cover forest management; EC3) Papers that are not in the search languages; EC4) Articles collection papers will be excluded, each article being included separately manually; EC5) Studies that do not address routes in forest management; EC6) Focus on forest fire risk; EC7) Theme completely oblivious to the search; EC8) Score 0. It is emphasized that, even with the automatic classification, it is possible for the reviewer to change this data, rectifying any failures that the classification may present. Due to the high number of articles with "Score 0", summarily excluded, it was possible to analyze and classify the other papers at this stage.

At the end of the protocol, questions were stipulated for the stages of selection and extraction of information, to be answered among the accepted papers. A first group on the quality of the work, analyzed in the selection stage, presents the following quality questions (QQ): QQ1) Optimizations were cited; QQ2) Optimization Detailing; QQ3) Mathematical model. These questions only accept "Yes/No" answers. In a later stage of data extraction, the extractions questions (EQ) and their respective answers are: EQ1) "Did you use optimization in forest management vehicle routing?" (Yes/No); EQ2) "Optimization Technique" (LP/Heuristic/Other/None); EQ3) "Detail Optimization Technique" (Open question); EQ4) "Methodology" (Open question); EQ5) "Did you use any evaluation metrics?" (Yes/No); EQ6) "Metric" (Open question); EQ7) "Was there data collection?" (Yes/No); EQ8) "Collection Mode" (Open question); EQ9) "Was there data analysis?" (Yes/No); EQ10) "Data Analysis software" (Open question); EQ11) "Analysis Mode" (Open question); EQ12) "Programming language / Software / Framework" (Open question); EQ13) "Execution Equipment" (Open question); EQ14) "Time to get solutions" (Open question); EQ15) "Other Observations" (Open question).

III. RESULTS

Once the protocol is constituted, we moved on to the Execution stage, feeding StArt software with search results and classifying articles. For each search engine it was applied correspondent strings to ("Forest Harvest" OR "Forest Management") AND "Optimization" AND "Road" AND "Network", as show in table I. The Springer search engine allows to export their results only in the .csv format, requiring an extra step to convert this data to the Biblatex (.bib) format. The other engines already allow to export in the .bib format, which is one of the possible means of inserting the search data into StArt. The other possible formats are Medline/PubMed, Research Information Systems (.ris), Cochrane, in addition to manual insertion of works. Figure 3 shows the amount of papers per search engine found from the largest amount to the smallest.

TABLE I
SEARCH STRINGS

Engine	String
ACM	[All: "forest harvest"] OR [All: "forest management"] AND [All: "optimization"] AND [All: "road"] AND [All: "network"] AND [Publication Date: Past 5 years]
Engineering Village	((("Forest Harvest" OR "Forest Management") AND "Optimization" AND "Road" AND "Network") WN ALL)
Science Direct	("Forest Harvest" OR "Forest Management") AND "Optimization" AND "Road" AND "Network"
Scopus	("Forest Harvest" OR "Forest Management") AND "Optimization" AND "Road" AND "Network"
Springer	("Forest Harvest" OR "Forest Management") AND "Optimization" AND "Road" AND "Network"

Papers by Search Engine

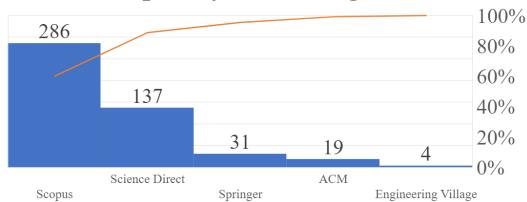


Fig. 3. Papers by search engine

Source: Authors

Table II presents the quantitative ones by quadrant, already with the percentages accepted and rejected in the selection.

TABLE II
RESULT OF CLASSIFICATION QUADRANTS

Quadrant	Amount	% Accepted	% Duplicated	% Rejected
Q1	5	100.00%	0.00%	0.00%
Q2	47	46.81%	6.38%	46.81%
Q3	5	20.00%	0.00%	80.00%
Q4	420	4.52%	1.67%	93.81%
Total	477	9.85%	2.10%	88.05%

Applying awards criteria during the Selection stage, we obtained results described in table III. Considering that it is possible to classify works in more than one criterion, the sum of the quantities presented in the table III may be greater than the number of articles obtained. The choice of criteria for each study was based primarily on the reading of abstracts and attempting to download the complete paper.

After accepting 47 papers in this stage, we moved to a more detailed reading of these works, evaluating the quality of the text and extracting information considered relevant from the texts. In this reading, a set of 15 papers considered accepted for the extraction of information was formed and the following detailed characteristics were restricted to those selected.

Starting with the analysis of the years of publication, illustrated in Figure 4. The articles are listed in the table IV in order of year of publication, with indications about approaches to route problems, scheduling of forest harvesting and integrated solution of these problems.

TABLE III
AWARDING CRITERIA

Type	Criterion	Paper Accepted	Paper Rejected
Inclusion	IC1) Studies related to the forest management area	9	14
	IC2) Use route optimization in forest management	1	4
	IC3) Addresses routes and loadings in forest management	2	9
	IC4) Review studies citing other route optimization references in forest management	0	3
	IC5) Addresses route maintenance/optimization	3	1
Exclusion	EC1) Papers not fully available through institutional access (paid) in the scientific bases sought	0	1
	EC2) Papers that do not cover forest management	0	14
	EC3) Papers that are not in search languages	0	1
	EC4) Articles collection papers will be excluded, each article being evaluated separately manually	0	1
	EC5) Studies that do not address routes in forest management will be excluded	0	11
	EC6) Focus on forest fire risk	0	4
	EC7) Theme completely oblivious to the search	0	36
	EC8) Score 0	0	351

Years of Publication

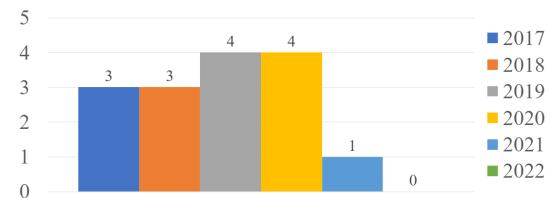


Fig. 4. Years of publication

Source: Authors

TABLE IV
PAPERS BY YEAR

Year	Paper	Roads	HS ²	Integrated
2017	Fiorentin et al. (2017)	✓		
	Kašpar et al. (2017)		✓	
	Pradenas-Rojas, Passicot-Guzmán (2017)	✓		
2018	Dong et al. (2018)		✓	
	Ross et al. (2018)	✓		
	Yoshimoto, Asante (2018)	✓	✓	✓
2019	Miranda Álvarez et al. (2019)	✓	✓	✓
	Santos dos et al. (2019)	✓		
	Søvde et al. (2019)	✓		
2020	Stang et al. (2019)		✓	
	Bellaventutte et al. (2020)	✓	✓	✓
	Monti et al. (2020)	✓		
	Naderializadeh et al. (2020)	✓	✓	✓
2021	Simonenkova et al. (2020)	✓	✓	✓
	Eker, Sessions (2020)		✓	

Considering both the publishing continent and the continent of the first author of the selected papers, as illustrated by the figures 5 and 6, we see the predominance of research in Americas. The table V relates the continent of origin to the continent of the first author of the papers.



Fig. 5. Journals by continent

Source: Authors



Fig. 6. First authors by continent

Source: Authors

TABLE V
JOURNAL CONTINENT VERSUS FIRST AUTHOR CONTINENT

Journal	First author continent			
	AS	EU	N.A.	S.A.
Asia (AS)	—	—	—	—
Europe (EU)	2	1	1	1
North America (N.A.)	1	3	1	1
South America (S.A.)	—	—	1	3

Analysing words used as keywords in the selected papers, of course, “Forest” appears 37 times, including the “forest”, “forests” and “forestry” forms; “Optimization” 25 times; “Harvest” 21 times including “harvesting” and “Scheduling” 18 times. With all keywords, the word cloud in Figure 7 was built.

As already mentioned, each paper received a score in this review process and, among those selected, there is a greater number of papers with a score below 20, as shown in Figure 8. The average score of the selected papers was 11.33 and the median 12. The first stage of the review, which deals with quality questions, has all selected papers with “Yes” answers.



Fig. 7. Keyword cloud

Source: Authors

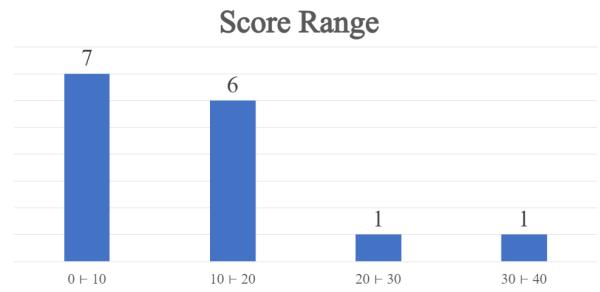


Fig. 8. Score Range

Source: Authors

About data extractions, all remaining accepted papers had “Yes” answer for non-open questions. Two questions of this step were formulated to identify the mode of computational implementation of the solutions presented in the papers: “Optimization Technique” and “Language / Software / Programming Framework”. Only one of them has a stochastic approach. The other papers use LP, heuristic techniques or hybrids of LP and heuristics, as shown in Fig. 9.

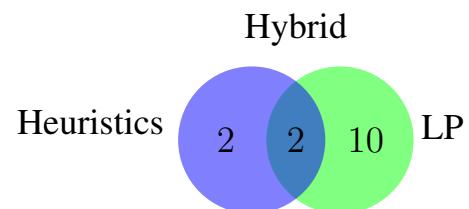


Fig. 9. Optimization Techniques

Source: Authors

For each technique it is possible to highlight some specific characteristics. In the LP papers, we found a balance between the use of the CPLEX, Gurobi and LINGO optimization tools, with a small advantage for CPLEX. Table VI presents the LP and Hybrid papers with their selected optmization software. Bellaventutte et al. (2020) and Eker, Sessions (2020) employ

hybridization in different ways: Bellavenutte et al. (2020) splits problems into subproblems with heuristics, working with Gurobi for solving that subproblems. On the other hand, Eker, Sessions (2020) makes use of heuristics to solve when LINDO does not get a feasible solution. For pure heuristic papers, Søvde et al. (2019) uses Python packages Numpy and Scipy in a Variable Neighborhood Search “to calculate the shortest paths for a large number of parameter combinations”; and Dong et al. (2018) uses Simulated Annealing heuristic applied to Forest Harvesting Scheduling.

TABLE VI
OPTIMIZATION TOOLS FOR LP AND HYBRID PAPERS

Tool	Paper	Version
CPLEX	Ross et al. (2018)	12.1.0
	Yoshimoto, Asante (2018)	12.7.0
	Stang et al. (2019)	12.6.1
	Simonenkova et al. (2020)	12.6
Gurobi	Kašpar et al. (2017)	6.5
	Santos dos et al. (2019)	8.1.1
	Bellavenutte et al. (2020) (Hybrid)	8.1
LINGO	Fiorrentin et al. (2017)	
	Eker, Sessions (2020) (Hybrid)	
	Monti et al. (2020)	
Unknown	Pradenas-Rojas, Passicot-Guzmán (2017)	
	Naderializadeh et al. (2020)	

Evaluating the open responses on solution evaluation metrics, we identified that most of the studies with some metric were of comparisons. Pradenas-Rojas, Passicot-Guzmán (2017) established 15 scenarios and compare their objective function values. Dong et al. (2018) considers the mean values of the objective function of the best solutions obtained for each proposed method. Ross et al. (2018) take into account net present values obtained by proposed model with control model without optimization. Yoshimoto, Asante (2018) exhibit two approaches, BK-Model I and PT-Model, and compare performances in two modes: by the CPU time when the models activate optimal solution or by the final value obtained otherwise. Miranda Álvarez et al. (2019) “implement an algorithmic strategy for computing pools of Pareto efficient solutions” for decision makers to select the policies best suited to their priorities. Santos dos et al. (2019), like Pradenas-Rojas, Passicot-Guzmán (2017), choose 13 scenarios “generated randomly, but based on real data” and compare total costs, solution time and harvested volume obtained. Looking for “improve harvesting cost calculations” Søvde et al. (2019) focus the discussion on the productivity function and establish a comparison with point estimates. Stang et al. (2019) apply a model in a real case and analyse gotten results with non optimized scenarios. Whereas Bellavenutte et al. (2020) use hybrid methods to split great problems into smaller, and with the possibility of get exact solution, their comparison consists into arrive at better solutions with reduced time in relation to the attempt to optimize the larger problem as a whole. Monti et al. (2020) contrast real average daily loaded/transported wood weight related to the possible amount of wood that could be transported. The value of the object function is the

parameter allowing Naderializadeh et al. (2020) to compare solutions incorporating roads and crops with solutions without integration, only with locations of crops. Finally, Simonenkova et al. (2020) take the values of the objective function and the time requires to find a solution were compared with those of the optimal solution developed based on the computational experiment.

The question about “Equipment” sought to identify whether the work required powerful machines to solve the problems or whether simple machines were being employed. Only 11 articles bring some information about equipments and just 7 articles mentioned RAM capacity. Naturally recent studies could use better equipments. Table VII correlates years of publication with reported RAM memory capacity and table VIII list these articles. Few studies mentioned the time necessary to obtain the final solution and, when done, most of them were the same as the time limit values, i. e., they were not able to find the optimal solution or to prove the optimality within the time limit. Moreover, making it impossible the time comparison among the different works.

TABLE VII
RAM CAPACITY BY DECADES PUBLICATION

RAM (GB)	2017	2018	2019	2020
8	—	—	1	—
12	—	—	1	—
16	1	—	—	1
32	—	1	—	—
64	—	—	1	—
96	—	—	—	1

TABLE VIII
ARTICLES WITH RAM CAPACITY

RAM	Article
8	Santos dos et al. (2019)
12	Stang et al. (2019)
16	Kašpar et al. (2017); Bellavenutte et al. (2020)
32	Ross et al. (2018)
64	Miranda Álvarez et al. (2019)
96	Naderializadeh et al. (2020)

Finally, the question “Methodology” concentrates the most important information to answer the questions about this review, explained in the next section.

IV. DISCUSSION

Rewrite this section

V. FINAL REMARKS

The objective of this review was to support ongoing research that integrates route planning and harvesting scheduling in a single model, considering operational research approaches and practices that are specific to the context of forest management. Considering the readings in this systematic review, we see that this theme has ample application and aperture for study. There is academic significance to address in an integrated way

the planning of the routes with the scheduling of the harvest, comparing solutions and time to obtain these solutions with non-integrated treatments, in two phases, either solving exact models or evaluating heuristic solutions. Thus, we conclude that our future proposal has a scientific contribution to the theme researched, which may be useful to other researchers in this field of study.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization: Scarpin, C. T and Loch, G.V.; Methodology: Rosa, C.E.G.; investigation: Rosa, C.E.G.; resources: Rosa, C.E.G.; writing-original draft preparation: Rosa, C.E.G.; writing-review and editing, Loch, G.V.; supervision: Scarpin, C. T and Loch, G.V.

ACKNOWLEDGMENTS

To Professor Júlio Arce for the notes made in the research.

REFERENCES

- Bellavenutte Pedro, Chung Woodam, Diaz-Balteiro Luis.* Partitioning and solving large-scale tactical harvest scheduling problems for industrial plantation forests // Canadian Journal of Forest Research. aug 2020. 50, 8. 811–818.
- Correa Renata Naoko, Scarpin Cassius Tadeu, Ferrari Línamara Smaniotti, Arce Julio Eduardo.* Application of relax-and-fix heuristic in the aggregation of stands for tactical forest scheduling // Forest Policy and Economics. 2020. 119.
- Dong Lingbo, Bettinger Pete, Qin Huiyan, Liu Zhaogang.* Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing // Silva Fennica. 2018. 52, 1.
- Eker Mehmet, Sessions John.* Refocusing on operational harvest planning model for state-owned forestry in Turkey // European Journal of Forest Engineering. dec 2020. 6. 96–106.
- Fiorentin Luan Demarco, Arce Julio Eduardo, Pelissari Allan Libanio, David Hassan Camil, Silva Pedro Henrique Belavenutti Martins da, Stang Mariana Bussolo, Filho Afonso Figueiredo.* Strategies for regulating timber volume in forest stands // Scientia Forestalis. dec 2017. 45, 116.
- Kašpar Jan, Hlavatý Robert, Kuželka Karel, Marušák Róbert.* The impact of assumed uncertainty on long-term decisions in forest spatial harvest scheduling as a part of sustainable development // Forests. sep 2017. 8, 9. 335.
- Kitchenham Barbara.* Procedures for performing systematic reviews // Keele, UK, Keele University. 2004. 33.
- Miranda Eduardo Álvarez, García-Gonzalo Jordi, País Cristobal, Weintraub Andrés.* A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty // Forest Policy and Economics. 2019. 103. 112–122. Models and tools for integrated forest management and forest policy analysis.
- Monti Cassio A.U., Gomide Lucas R., Oliveira Rafael M., França Luciano C.J.* Optimization of Wood Supply: The Forestry Routing Optimization Model // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 11 2020. 92, 3. 1–17.
- Naderializadeh Nader, Crowe Kevin A., Pulkki Reino.* On the importance of integrating transportation costs into tactical forest harvest scheduling model // Croatian journal of forest engineering. apr 2020. 41, 2. 267–276.
- Octaviano F.R., Felizardo K.R., Maldonado J.C. et al.* Semi-automatic selection of primary studies in systematic literature reviews: is it reasonable? // Empir Software Eng. 2015. 20.
- Pradenas-Rojas Lorena, Passicot-Guzmán Philippe.* Optimizing the use of cranes and trucks in forestry operations // DYNA. jun 2017. 84, 201. 172–179.
- Ross Kai L., Tóth Sándor F., Jaross Weikko S.* Forest Harvest Scheduling with Endogenous Road Costs // Interfaces. 5 2018. 48, 3. 260–270.
- Santos Paulo Amaro Velloso Henriques dos, Silva Arinei Carlos Lindbeck da, Arce Julio Eduardo, Augustynczik Andrey Lessa Derci.* A mathematical model for the integrated optimization of harvest and transport scheduling of forest products // Forests. dec 2019. 10, 12. 1110.
- Simonenkova A, Simonenkova M, Bacherikov I.* Optimization of forest road network layout problem // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. mar 2020. 817, 1. 012032.
- Søvde Nils Egil, Astrup Rasmus, Talbot Bruce.* An inverse shortest path approach to find forwarder productivity functions // Computers and Electronics in Agriculture. jun 2019. 161. 53–61. BigData and DSS in Agriculture.
- Stang Mariana Bussolo, Arce Julio Eduardo, Amaral Machado Sebastião do, Belavenutti Pedro Henrique, Fiorentin Luan Demarco.* Spatial Forest Planning for Optimized Harvest Scheduling // Floresta e Ambiente. 2 2019. 26, 1. 20160100.
- Yoshimoto Atsushi, Asante Patrick.* A New Optimization Model for Spatially Constrained Harvest Scheduling under Area Restrictions through Maximum Flow Problem // Forest Science. apr 2018. 64, 4. 392–406.