

## Problema de agendamento de colheita florestal: comparação entre dois modelos matemáticos considerando aspectos ambientais e econômicos

Renata Naoko Corrêa – Grupo de Tecnologia Aplicado à Otimização (GTAO)/ PPGMNE-Universidade Federal do Paraná (UFPR) – [naokorenata@gmail.com](mailto:naokorenata@gmail.com)

Cassius Tadeu Scarpin – GTA0/ PPGMNE-UFPR - [cassiusts@gmail.com](mailto:cassiusts@gmail.com)

**Resumo:** Neste trabalho é apresentado uma comparação entre dois modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o problema de agendamento de colheita florestal. Os dois modelos tem o objetivo de maximizar o Valor Presente Líquido (VPL). Um dos modelos consta na literatura e trabalha com imposição de área máxima de colheita de talhões adjacentes. Sendo um aspecto ambiental, em que se evita, por exemplo, a erosão do solo, a diminuição ou perda de espécies de fauna. Já o modelo desenvolvido pelos autores, além de possuir imposições ambientais, dispõe de restrições de agregação de talhões, que favorece aspectos econômicos, por exemplo, minimização de custo de deslocamento de maquinários para a colheita. Ao longo da comparação, analisando resultados numéricos e espacialização do agendamento de colheita, o modelo desenvolvido se mostra mais adequado para atender as situações reais do manejo florestal.

**Palavras chave:** Agendamento de colheita florestal, restrições ambientais, restrições econômicas, agregação de talhões, programação linear inteira mista

## Forest harvest scheduling problem: comparison between two mathematical models, considering environmental and economic aspects

**Abstract:** This paper presents a comparison between two Mixed Integer Linear Programming (MILP) models for the forest harvest scheduling problem. Both models aim to maximize Net Present Value (NPV). One of the models is in the literature and works with the imposition of the maximum harvest area of adjacent fields. It is an environmental aspect that avoids, for example, soil erosion, decrease or loss of species of fauna. The model developed by the authors, besides having environmental impositions, allowing stands aggregation restrictions, which favor economic aspects, for example, minimizing the cost of displacement of harvesting machinery. Throughout the comparison, analyzing numerical results and spatialization of harvest scheduling, the developed model proves to be more adequate to meet the real situations of forest management.

**Key-words:** Forest harvest scheduling, environmental constraints, economic constraints, aggregation of stands, mixed integer linear programming

### 1. Introdução

O Brasil é um dos países que se destacam no cenário mundial por possuir uma das maiores reservas florestais do planeta. Ainda é considerado como referência no desenvolvimento de tecnologias para o cultivo de florestas tropicais, com produtividade impressionante (SCHETTINO & MACHADO, 2018). Logo, é necessário de um planejamento florestal eficaz, que garante uma floresta produtiva ao longo das rotações.

Dentro do planejamento florestal existem problemas de construção de estradas, colheita, transporte, entre outros. Em todas as situações deve existir atenção nas questões sociais e ambientais. Logo para oferecer um suporte a tomada de decisão de forma a atender estas

questões junto com a parte econômica, a comunidade florestal faz uso dos modelos de Pesquisa Operacional (RÖNNQVIST et al., 2015). O problema a ser apresentado no trabalho é o problema de agendamento de colheita florestal.

Na literatura a área de corte é um aspecto muito trabalhado no problema de agendamento florestal (MURRAY, 1999; MCDILL et al., 2002; MURRAY & WEINTRAUB, 2002; CONSTANTINO et al., 2008 MCDILL & GEORGE, 2013; GOYCOOLEA et al., 2015; DONG et al., 2015; AUGUSTYNCZIK et al., 2015; BORGES et al., 2016). Ao limitar a área de corte contíguos, os impactos da colheita como, erosão do solo, diminuição de fluxo de água do rio, diminuição ou perda de espécies de fauna e degradação da beleza cênica, são minimizados (RÖNNQVIST et al., 2015). Por conta das grandes áreas de monoculturas, existe uma mudança significativa no ambiente, comprometendo tanto a fauna quanto a flora (CASTRO et al., 2018). McDill et al. (2002) apresenta a diferença entre as abordagens *Unit Restriction Model* (URM) e *Area Restriction Model* (ARM). O URM se enquadra como modelo que não permite a violação da colheita de duas unidades adjacentes, como forma de violar o limite de área máxima. Já a abordagem ARM impõe restrições de área máximas de colheita, de forma que permita a colheita de talhões adjacentes no mesmo período, contanto que a área combinada não exceda a área máxima estabelecida.

No presente estudo será considerado apenas a abordagem ARM por ser o mais aplicado na realidade do manejo florestal brasileira. Quanto aos trabalhos citados, Constantino et al. (2008) desenvolveu um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) com variáveis e restrições polinomiais para a abordagem ARM, que contribuiu no tempo computacional do problema de agendamento florestal.

Em contrapartida, a agregação de talhões, apesar de ser um tema importante, não recebe atenção na literatura (AUGUSTYNCZIK et al., 2016). A agregação pode beneficiar na parte econômica do manejo, através da diminuição do custo de transporte de máquinas de colheita de madeira (HEINONEN et al., 2018) e na redução de construção e manutenção de estradas (ÖHMAN; ERIKSSON, 2010).

O presente estudo apresenta uma comparação entre o modelo PLIM de Constantino et al., (2008) e o modelo PLIM desenvolvido pelos autores para problema de agendamento de colheita florestal de planejamento tático. O modelo de Constantino et al., (2008) tem objetivo de maximizar o Valor Líquido Presente (VPL) e possui imposições de área máxima como abordagem ambiental, além da abordagem de equilíbrio de volume entre anos consecutivo. Este modelo foi escolhido para comparação por ter algumas semelhanças na forma da modelagem. Já o modelo desenvolvido tem por objetivo maximizar o VPL, abordando o equilíbrio ambiental e econômico. De forma a atender a área máxima gerado num bloco e ao mesmo tempo tentando agregar os talhões para fins econômicos. O modelo se torna mais complexo, já que atende objetivos florestais conflitantes.

A estrutura da pesquisa consiste em I) comparar os dois modelos, quanto ao tempo computacional, o VPL obtido, assim como a espacialização do agendamento de colheita; II) verificar que o modelo desenvolvido atende mais a realidade praticado no manejo florestal. O trabalho está organizado na seguinte ordem. Seção 2 apresenta os modelos matemáticos e o estudo de caso. Os resultados e discussões na Seção 3 e por fim as conclusões na Seção 4.

## 2. Material e Método

Os modelos para a comparação, citados na seção anterior, consideram na função objetivo a maximização do VPL, sendo possível comparar entre os dois modelos para verificar as vantagens e desvantagens de ambas. Logo, foi considerado o grafo  $G(V, A)$ , definido por um conjunto de vértices  $V$ , que representa o conjunto dos talhões na floresta, e um conjunto de arcos  $A$ . Os elementos de  $A$  representam a conexão entre pares de vértices, ou seja, entre pares de talhões, este conjunto possui conexões de todos os vértices com todos os demais. As formulações serão apresentadas a seguir de forma individualizada.

### 2.1. Modelo Matemático Constantino et al. (2008)

Nesta formulação utilizou-se o conceito de classes de corte, e o número de conjuntos de cortes foi definido como o número de talhões. Na Tabela 1 é apresentada as notações usadas no modelo (CONSTANTINO et al., 2008), e em seguida será mostrado a formulação de forma detalhada.

Conjuntos	Descrição
$V$	Conjunto dos talhões na floresta
$T$	Conjunto dos períodos ao longo do HP
$E$	Conjunto de arcos que conectam talhões adjacentes
$\mathcal{C}$	Classes de corte $\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_{ V }\}$
$C_i$	Conjunto de cortes $i$
Índices	Descrição
$j$	Talhão: $1, \dots,  V $
$t$	Período do HP: $1, \dots,  T $
$e$	Arco que conecta dois talhões $\{j_1, j_2\}$ adjacentes: $1, \dots,  E $
$i$	Classe de corte: $1, \dots,  \mathcal{C} $
Parâmetros	Descrição
$p_j^t$	VPL gerado pelo talhão $j$ quando colhido no período $t$
$a_j$	Área do talhão $j$
$A_{max}$	Área máxima para colheita
$V_j^t$	Volume gerado pelo talhão $j$ quando colhido no período $t$
$\Delta$	Percentual de variação de volume em relação ao volume colhido no período anterior do HP, em decimais
Variáveis	Descrição
$y_j^{it}$	Assume 1 se o talhão $j$ pertence ao conjunto $C_i$ no período $t$ , 0 caso contrário
$w_e^{it}$	Assume 1 se pelo menos um dos talhões no arco $e$ pertence ao conjunto $C_i$ no período $t$ , 0 caso contrário

Fonte: Constantino et al., (2008)

Tabela 1 – nomenclaturas usadas no modelo (CONSTANTINO et al., 2008)

Maximizar

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in V} p_j^t \sum_{i \in V} y_j^{it} \quad (1)$$

Sujeito a

$$y_j^{it} - w_e^{it} \leq 0 \quad \forall e \in E, j \in V, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} w_e^{it} \leq 1 \quad \forall e \in E, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in V} a_j y_j^{it} \leq A_{max} \quad \forall i \in V, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in V} y_j^{it} \leq 1 \quad \forall j \in V \quad (5)$$

$$(1 - \Delta) \sum_{j \in V} V_j^{t-1} \left( \sum_{i \leq j} y_j^{i,t-1} \right) \leq \sum_{j \in V} V_j^t \left( \sum_{i \leq j} y_j^{it} \right) \quad \forall t = 2, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} V_j^t \left( \sum_{i \leq j} y_j^{it} \right) \leq (1 + \Delta) \sum_{j \in V} V_j^{t-1} \left( \sum_{i \leq j} y_j^{i,t-1} \right) \quad \forall t = 2, \dots, T \quad (7)$$

$$y_j^{it}, w_e^{it} \in \{0,1\} \quad \forall e \in E, j \in V, i \in V, t \in T \quad (8)$$

A função objetivo (1) visa maximizar o VPL da colheita ao longo do HP. O grupo de restrição (2) define a relação entre as variáveis  $y_j^{it}$  e  $w_e^{it}$ . A restrição (3) garante, a cada dois talhões adjacentes, que estes estejam, no máximo, em um conjunto de corte. O conjunto de restrições (4) assegura que cada conjunto de corte não atinja a área máxima para todos os anos. A restrição (5) afirma que cada talhão pode ser colhido no máximo uma vez no HP. Os grupos de restrições (6) e (7) impõe para cada período, o equilíbrio de volume colhido em relação ao período anterior, levando em consideração a variação permitida. Os conjuntos de restrição (8) tornam as variáveis binárias.

## 2.2. Modelo Matemático desenvolvido pelos autores

Este modelo apresenta restrições econômicas e ambientais. As econômicas estão relacionadas a agregação de talhões, a aproximação de blocos do mesmo período e a área mínima necessária para valer a pena o deslocamento do módulo de colheita. Já as ambientais atendem restrições de área máxima, de não colher talhões adjacentes em anos consecutivos. A Tabela 2 apresenta as notações usadas na formulação do modelo.

Conjuntos	Descrição
$V$	Conjunto dos talhões na floresta
$T$	Conjunto dos períodos ao longo do HP
$A$	Conjunto de arcos que conectam dois talhões
$B_t$	Conjunto de blocos no período $t$
Índices	Descrição
$j, k$	Talhão: $1, \dots,  V $
$t$	Período do HP: $1, \dots,  T $
$b, c$	Bloco no período $t$ : $1, \dots,  B_t $
Parâmetros	Descrição
$p_j^t$	VPL gerado pelo talhão $j$ quando colhido no período $t$
$a_j$	Área do talhão $j$
$A_{max}$	Área máxima para colheita

$A_{min}$	Área mínima para colheita
$V_j^t$	Volume gerado pelo talhão $j$ quando colhido no período $t$
$\Delta$	Percentual de variação de volume em relação ao volume colhido no primeiro período do HP, em decimais
$\alpha_{jk}$	Elemento da matriz de adjacência que é igual a 1 se o talhão $j$ é adjacente ao talhão $k$ e 0 caso contrário
$d_{jk}$	Distância em número de arcos do talhão $j$ ao talhão $k$
$D_{talhão}$	Distância máxima em número de arcos que um talhão pode ficar de outro talhão no mesmo período e mesmo bloco
$D_{período}$	Distância máxima em número de arcos que um talhão pode ficar de outro talhão no mesmo período em blocos diferentes
$D_{bloco}$	Distância máxima em número de arcos que um bloco pode ficar de outro bloco em períodos consecutivos

Variáveis	Descrição
$x_j^{bt}$	Assume 1 se o talhão $j$ for colhido no período $t$ no bloco $b$ , 0 caso contrário
$z^{bt}$	Assume 1 se o bloco $b$ for gerado no período $t$ , 0 caso contrário

Fonte: os autores

Tabela 2 – nomenclaturas usadas no modelo

Maximizar

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in V} p_j^t \sum_{b \in V} x_j^{bt} \quad (9)$$

Sujeito a

$$\sum_{j \in V} V_j^t \left( \sum_{b \in B_t} x_j^{bt} \right) \geq (1 - \Delta) \sum_{j \in V} V_j^1 \left( \sum_{b \in B_t} x_j^{b1} \right) \quad \forall t = 2, \dots, T \quad (10)$$

$$\sum_{j \in V} V_j^t \left( \sum_{b \in B_t} x_j^{bt} \right) \leq (1 + \Delta) \sum_{j \in V} V_j^1 \left( \sum_{b \in B_t} x_j^{b1} \right) \quad \forall t = 2, \dots, T \quad (11)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{b \in B} x_j^{bt} \leq 1 \quad \forall j \in V \quad (12)$$

$$\sum_{j \in V} a_j x_j^{bt} \leq A_{max} z^{bt} \quad \forall b \in B_t, t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{j \in V} a_j x_j^{bt} \geq A_{min} z^{bt} \quad \forall b \in B_t, t \in T \quad (14)$$

$$\alpha_{jk} (x_j^{bt} + x_k^{ct}) \leq 1 \quad \forall j \in V, k > j, t \in T, b \in B_t, c \neq b \quad (15)$$

$$d_{jk} (x_j^{bt} + x_k^{bt} - 1) \leq D_{talhão} \quad \forall j \in V, k > j, t \in T, b \in B_t \quad (16)$$

$$d_{jk} (x_j^{bt} + x_k^{ct} - 1) \leq D_{período} \quad \forall j \in V, k > j, t \in T, b \in B_t, c \neq b \quad (17)$$

$$\alpha_{jk} \left( x_j^{bt} + x_k^{c(t+1)} \right) \leq 1 \quad \forall j \in V, k \in V, b \in B, c \in B_t, \quad (18)$$

$$t = 1, \dots, |T| - 1$$

$$d_{jk} \left( x_j^{bt} + x_k^{c(t+1)} \right) \leq 2D_{bloco} \quad \forall j \in V, k \in V, b \in B_t, c \in B_t, \quad (19)$$

$$t = 1, \dots, |T| - 1$$

$$x_j^{bt}, z^{bt} \quad \forall j \in V, t \in T, b \in B_t \quad (20)$$

A função (9) tem por objetivo maximizar o VPL da colheita ao longo do HP. As restrições (10) e (11) impõe que o volume colhido em um período atenda a variação relacionada com o volume do primeiro período do HP. Dessa maneira, o volume colhido em todos os períodos será mais linear, considerando que a comparação da variação de volume sempre ocorre com o mesmo volume, o do primeiro período. O conjunto de restrição (12) garante que o talhão pode ser colhido no máximo em um período do HP e em um único bloco. Os grupos de restrições (13) e (14) asseguram que o bloco de talhões não ultrapasse a área mínima e máxima. A área mínima é importante para que o módulo de colheita não se desloque na floresta até uma região muito pequena, sendo um aspecto econômico, já a área máxima é necessária para que não ocorra a colheita numa região grande, assim se garante o refúgio da fauna. A restrição (15) impõe que talhões adjacentes não possam pertencer a blocos distintos do mesmo período, evitando assim, a junção de blocos no mesmo período, o que acarretaria numa extensa região de corte em um período.

A restrição (16) garante que dado dois talhões, se selecionados no mesmo período e para o mesmo bloco, a distância entre ambos deve respeitar a distância máxima imposta. De forma semelhante, dado dois talhões selecionados no mesmo período em blocos diferentes, o conjunto de restrição (17) impõe que a distância em arcos entre estes talhões seja inferior ou igual a distância máxima imposta. O grupo de restrições (18) faz com que talhões adjacentes não sejam selecionados em anos consecutivos. Ao evitar isto, contribuirá na parte ecológica da floresta, como a qualidade do solo. A restrição (19) garante que, apesar da restrição anterior, blocos de períodos consecutivos fiquem o mais próximo possível, respeitando a distância imposta. Desta forma, é possível aproveitar as mesmas estradas do período anterior, minimizando o custo de manutenção de estradas. As restrições (18) e (19) em conjunto favorecem aspectos tanto econômicos como ecológicos. Os conjuntos de restrições (20) garantem que as variáveis sejam binárias.

### 2.3. Estudo de Caso

Para a análise e comparação dos dois modelos citados, foi elaborado três florestas com dados hipotéticos que possuem o mesmo formato. A diferença entre elas são as idades das árvores em cada talhão. A floresta é constituída por 1189,95 hectares (ha) dividida em 101 talhões, com média de 11,78 ha por talhão. A espécie considerada para a criação da base foi o *Pinus taeda*, a simulação do crescimento e produção volumétrica da floresta foram processadas pelo software *SisPinus* ofertada pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Foi considerado uma taxa inicial de sobrevivência de 95% e o fluxo de caixa associado às áreas a serem colhidas foi definido com 10% de juros ao ano.

Segundo Moreira & Oliveira (2017) a colheita de madeira da espécie *Pinus spp.* no Brasil, quando se considera florestas comerciais, ocorre a partir de 13 anos de idade da espécie. Tomando esta afirmação, foi gerado 3 problemas de agendamento florestal em que. Foram classificamos como: floresta velha (V) em que as idades dos talhões variam de 10 a 16 anos,

floresta nova (N) com idades variando entre 5 a 13 anos e a floresta com árvores com idades aleatórias (A) entre 5 e 16 anos. Para as florestas V e N a distribuição das idades nos talhões foi elaborado em formato de blocos, ou seja, considerando uma vizinhança de 1 a 7 talhões que possuem árvores de mesma idade. A partir destes blocos, foi sorteado uma idade no intervalo que cada floresta tinha (sorteio seguindo uma distribuição Uniforme), a necessidade deste cuidado é para criar florestas próximas do real, já que na prática se planta um conjunto de talhões próximos no mesmo período. Na Figura 1 é possível observar a distribuição das idades no primeiro ano do HP das três florestas.

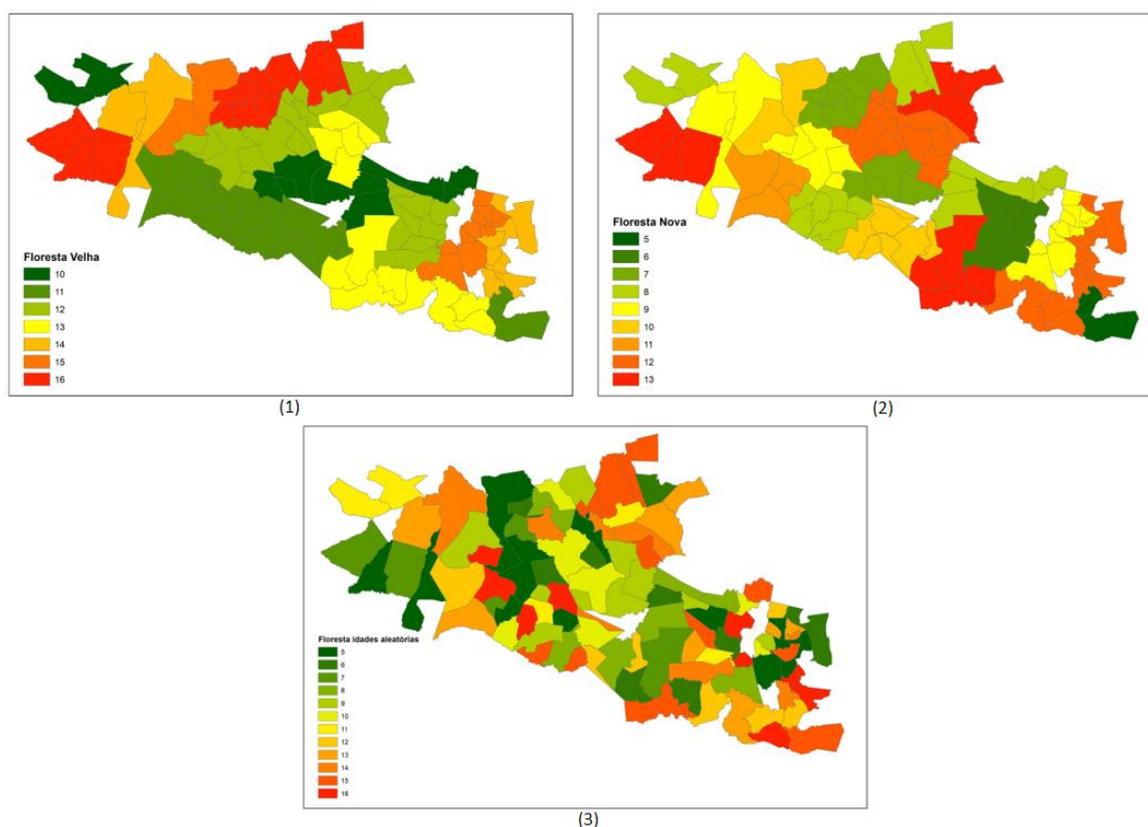


Figura 1 – Distribuição das idades no primeiro ano do HP: (1) da floresta velha, (2) da floresta nova e (3) da floresta com idades aleatórias

Considerou-se, para as duas formulações, HP de 5 anos, variação de volume de 15% ( $\Delta = 0,15$ ) e área máxima de 200 ha. Para o modelo de Constantino et al. (2008) foi considerado 101 conjuntos de cortes, a mesma quantidade de talhões.

Para o modelo matemático desenvolvido pelos autores ainda é necessário como parâmetro a área mínima de 50 ha. A distância máxima para a agregação de talhões no mesmo período e no mesmo bloco foi de  $D_{talhão} = 4$  arcos, já a distância máxima para a agregação de talhões no mesmo período de blocos distintos foi de  $D_{período} = 10$  arcos. Por outro lado, a aproximação de blocos de anos consecutivos foi definida com uma distância máxima de  $D_{bloco} = 16$  arcos. Estes parâmetros foram utilizados para as três florestas, já que se referem a mesma área e espacialização. A distância entre dois talhões  $d_{jk}$  foi calculada previamente com o algoritmo Dijkstra, que obtém a distância mínima entre dois nós, considerou-se 1 o custo entre os talhões adjacentes.

O número máximo de blocos que podem ser gerados por ano foi fixado para os 5 anos e obteve-se dividindo a área da floresta 1189,95 pelo valor de 200, a área máxima permitida.

Arredondando para cima, o número de blocos por ano foi definido em 6 blocos.

No total, foram gerados 6 cenários (Tabela 3), três cenários com o modelo de Constantino et al. (2008), adotou-se a nomenclatura C para identificar cenários com essa modelagem e identificados com a numeração 1 a 3. Os outros 3 cenários resolvidos pelo modelo desenvolvido pelos autores, que é possível identificar pelos cenários 4 a 6 e possui a nomenclatura E. Cada cenário de 1 a 3 a floresta é composta por uma das 3 distribuições de idades, e é possível comparar com um dos cenários 4 a 6. Para todos os cenários, o tempo limite definido foi de 1 hora (h), equivalente a 3600 segundos (s).

Cenário	Nomenclatura	Modelo
1	C_V	1 – 8
2	C_N	1 – 8
3	C_A	1 – 8
4	E_V	9 – 20
5	E_N	9 – 20
6	E_A	9 – 20

Fonte: os autores (2019)

Tabela 3 – A tabela expõe os cenários testados com os respectivos modelos

Os modelos foram desenvolvidos na linguagem C# no Visual Studio 2017 e otimizado por meio do software Gurobi 8.1, em um computador *Intel® Core™ i7-3537U*, 2.00 GHz e 6.0 Gb de RAM.

### 3. Resultados e Discussões

Ao analisar os resultados (Tabela 4) é possível verificar que existe uma diferença significativa no tempo de processamento. O GAP é um dado fornecido pelo otimizador e representa o percentual de diferença entre o menor limite superior e maior limite inferior conhecidos. Quando a diferença percentual é zero, então se tem a otimalidade. Além dos cenários 4 a 6 atingir o tempo limite, o seus GAP representam que não encontrou ou não provou a solução ótima.

Cenário	Nomenclatura	Tempo (s)	GAP (%)	FO (R\$)
1	C_V	63,48	0,00	22.573.741,97
2	C_N	138,23	0,00	14.852.951,02
3	C_A	215,56	0,00	16.613.936,93
4	E_V	3600	1,40	22.182.627,87
5	E_N	3600	1,64	14.337.442,39
6	E_A	3600	7,39	15.234.915,80

Fonte: os autores (2019)

Tabela 4 – Soluções dos cenários otimizados com o objetivo de maximizar VPL, junto com o tempo de processamento e GAP.

Observando a Figura 2, a espacialização dos cenários 4 ao 6 apresenta uma organização quanto a agregação dos talhões e agrupamento dos blocos, assim como os blocos de dois anos consecutivos não serem vizinhos, respeitando todas as imposições do modelo. Por conta do GAP ser alto, o cenário 6 apresenta uma espacialização que possui mais talhões que não foram agendados para corte ao longo do HP.

Os cenários 1 a 3 possuem os maiores VPL ao longo do HP comparando com os cenários 4 a 6, isto porque é possível verificar que nos três primeiros cenários se consegue agendar todos os talhões. Além disso, o modelo dos cenários 4 a 6 apresenta maior número de restrições sendo o motivo da tendência do VPL ser inferior quando comparado com os cenários 1 a 3, respectivamente.

No cenário 1 é possível verificar que os talhões selecionados para o corte no ano 3 (amarelo) estão bem dispersos, praticamente nos dois extremos da floresta e no centro. Em oposição ao cenário 4, que referente ao mesmo ano, está de forma aglomerada. Esta observação se nota quando se compara as duas formulações apresentadas. O cenário 1 obteve R\$ 391.114,10 a mais de VPL que o cenário 4, mas não foram considerados os custos de deslocamento entre os talhões. Com a comparação anterior, é possível deduzir que existirá mais deslocamento no cenário 1 em relação ao cenário 4, ou seja, mais custo de deslocamento.

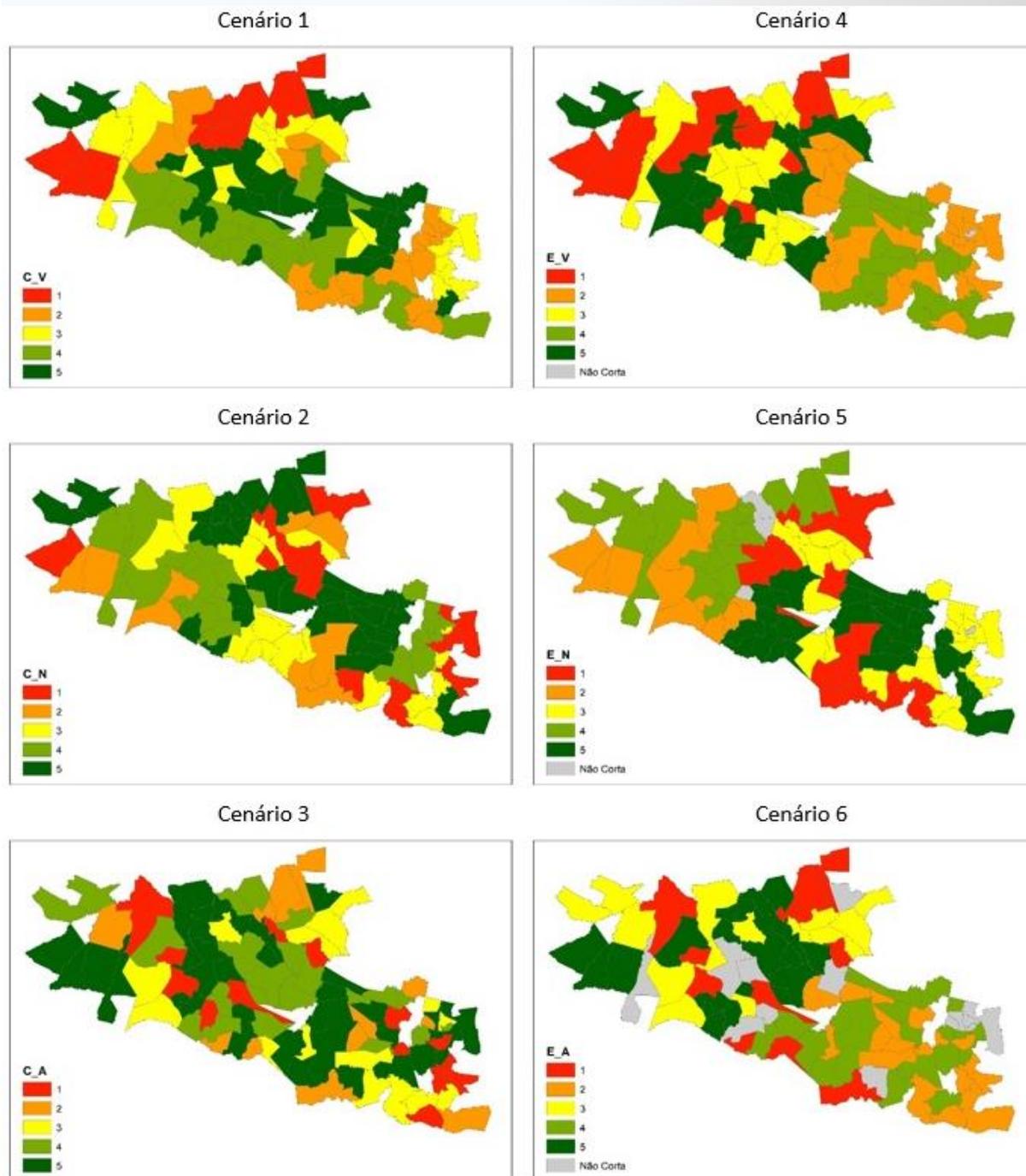


Figura 2 – Distribuição espacial do agendamento de colheita dos cenários testados, considerando um HP de 5 anos e cada cor representar o agendamento de um ano do HP

Os cenários 2 e 5 não seriam agendamentos bons, já que colhem toda a floresta ou boa parte dela e se tratando de uma floresta nova, implica na colheita de árvores muito novos. Entretanto nota-se as regiões com talhões que possuem árvores mais velhas sendo cortadas nos dois primeiros anos. Isto porque como o objetivo dos dois modelos era a maximização do VPL, os modelos pegam as regiões mais velhas nos primeiros anos, por conta de maior volume, gerando mais VPL.

Os cenários 3 e 6 que possuem uma distribuição aleatória de idades, por conta disso, o cenário 3 possui um agendamento bem aleatório com blocos de colheitas bem pequenos, sendo bem

desfavorável economicamente, considerando o deslocamento e a área mínima necessária para compensar os custos do módulo de corte.

Na Figura 3, os gráficos mostram a quantidade de volume agendado para a colheita ao longo do Horizonte de Planejamento dos cenários 3 e 6. No cenário 3 o volume vai aumentando ao longo do Horizonte de Planejamento, porém se sabe que é raro ter uma demanda sempre progressiva positivamente. Já no cenário 6, a variação entre os anos é de forma linear, considerando o percentual permitido, sendo uma representação mais próxima do real, em que a produção ocorre de forma linear ao longo do HP. Esta comparação é possível aplicar nos cenários 1 e 4, também nos cenários 2 e 5.

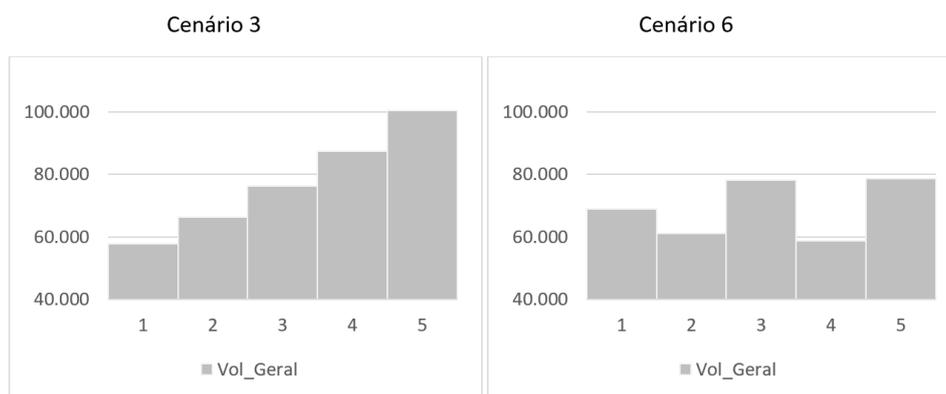


Figura 3 – Gráficos dos cenários 3 e 6 referentes aos volumes gerados para a colheita ao longo do HP

De forma geral é possível verificar que existiu a agregação dos talhões nos cenários 4 a 6 enquanto os cenários 1 a 3 apresentam blocos com quantidade de talhões pequenos, gerando um custo de deslocamento de maquinários alto em relação ao VPL gerado. Assim como dispersão dos blocos gerados no mesmo período, de forma a obrigar mais construção e/ou manutenção de estradas que os 3 últimos cenários.

#### 4. Conclusão

O presente trabalho apresenta uma comparação entre dois modelos matemáticos para o problema de agendamento florestal. O modelo encontrado na literatura possui apenas 7 conjuntos de restrições, não conseguindo de forma mais efetiva atender os dois objetivos florestais conflitantes, econômico e ambiental, quando comparado com o modelo desenvolvido pelos autores. Em contrapartida, o tempo computacional é bem mais rápido que do modelo desenvolvido, porém considerando que se trata de um planejamento tático, 1h de processamento não é considerando um tempo impraticável.

Com os cenários testados, é possível verificar que o modelo desenvolvido se adequa mais ao que é praticado nas empresas florestais, levando em consideração o equilíbrio dos aspectos econômicos e ambientais. Porém ao tentar solucionar, acaba se tornando uma complexidade computacional, considerando casos reais e com florestas com muitos talhões, este modelo cresce exponencialmente. Logo, é importante estudos com desigualdades válidas e/ou aplicações de heurísticas que consigam resolver de forma mais rápida o modelo.

Para os futuros trabalhos, também será interessante utilizar base de dados que possuam estradas, com a possibilidade de construção e/ou manutenção das mesmas, no contexto

operacional da colheita, de forma a minimizar os custos, incluindo o custo de deslocamento de maquinários. Aplicando nas soluções dos modelos para comprovar numericamente o que foi possível verificar na espacialização. Que o modelo desenvolvido proporciona um custo inferior que o modelo da literatura.

Contemplando a agregação de talhões e a aproximação de blocos, o modelo E considera distâncias máximas permitidas como parâmetros. Ao longo dos testes, observou-se que quando se restringia mais, colocando parâmetros inferiores do que utilizados nos cenários, o modelo se tornava infactível. Se permitisse parâmetros maiores, a espacialização do agendamento não era agradável. Logo, o modelo E possui esta fragilidade, tornando muito dependente dos parâmetros de distância máxima, que nos futuros trabalhos, seria interessante a adaptação do modelo para não existir a fragilidade.

## Referências

AUGUSTYNCZIK, A. L. D. et al. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **CERNE**, v. 21, n. 4, p. 649–656, 2015.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through Integer Linear Programming and Goal Programming. **Journal of Forest Economics**, v. 24, p. 72–81, 2016.

BORGES, P. et al. Effects of site productivity on forest harvest scheduling subject to green-up and maximum area restrictions. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 5, p. 507–516, 2016.

CASTRO, T. R.; VEDOVATO, A. J.; BRANDÃO, J. **Sistema Agroflorestal como Alternativa Sustentável**. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa: Associação Paranaense de Engenharia de Produção, 2018.

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J. G. A New Mixed-Integer Programming Model for Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions A New Mixed-Integer Programming Model for Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions. **Operations Research**, v. 56, n. 3, p. 542–551, 2008.

DONG, L. et al. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: A case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, v. 356, n. 15, p. 124–135, 2015.

GOYCOOLEA, M. et al. Harvest to Maximum Area Scheduling Subject Exact Approaches Restrictions : Exploring. **Operations Research**, v. 53, n. 3, p. 490–500, 2015.

HEINONEN, T. et al. Aggregating micro segments into harvest blocks by using spatial optimization and proximity objectives. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, n. 10, p. 1184–1193, 2018.

MCDILL, M. E.; GEORGE, S. Testing the Use of Lazy Constraints in Solving Area-Based Adjacency Formulations of Harvest Scheduling Models. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 157–176, 2013.

MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest Scheduling with Area-Based Adjacency

Constraints. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 631–642, 2002.

MOREIRA, J. M. M. Á. P.; OLIVEIRA, E. B. DE. Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais. In: **Embrapa Florestas**. [s.l: s.n.]. p. 11–20.

MURRAY, A. T. Harvest Scheduling THE UNITED AND there are increasing. **Forest Science**, v. 45, n. 1, p. 45–52, 1999.

MURRAY, A. T.; WEINTRAUB, A. Scale and Unit Specification Maximum Area Restrictions. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 779–789, 2002.

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

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

SCHETTINO, S.; MACHADO, J. S. **Aspectos ergonômicos da colheita florestal mecanizada : uma revisão bibliográfica**. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa: Associação Paranaense de Engenharia Produção, 2018.