

No grupo III, as três espécies mais importantes representam apenas 11,51% do número de indivíduos.ha<sup>-1</sup>. Esse grupo é caracterizado por apresentar a maior diversidade florística, sendo composto por 196 espécies arbóreas, área basal igual a 23,85 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup> e densidade de 201 ind.ha<sup>-1</sup>.

Constata-se que os grupos foram marcados pela presença das espécies *Tetragastris altissima* e *Pseudolmedia laevis*. Uma possível explicação para a grande quantidade de indivíduos de *T. altissima* (breu-vermelho) pode estar relacionada principalmente ao fato de ser uma espécie tolerante à sombra, e que se adapta facilmente a ambientes perturbados como os de uma clareira, em sua fase inicial de desenvolvimento (JARDIM et al., 2007).

#### 4. Conclusões

A análise de agrupamento realizada definiu três grupos com diferentes índices de diversidade, com predomínio das espécies *Tetragastris altissima* e *Pseudolmedia laevis* nos grupos formados.

#### Referências

- BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Plano de Manejo: Reserva Extrativista Chico Mendes.** Xapuri: MMA, 2006, 91 p. Disponível em: <[http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/resex\\_chico\\_mendes.pdf](http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/resex_chico_mendes.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2015.
- GOLDSCHMIDT, R., PASSOS, E., BEZERRA, E.: **Data Mining: conceitos, técnicas, algoritmos, orientações e aplicações.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2. ed., 2015.
- JARDIM, F. C. da S; SERRÃO, D. R; NEMER, T. C. 2007. Efeito de diferentes tamanhos de clareiras, sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas, em Moju-PA. **Acta Amazonica**, v. 37, n.1, p. 37- 48, 2007.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis.** 3 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992. 642 p.
- MUELLER-DUMBOIS, D.; ELLENBERG, H. **Aims and methods of vegetation ecology.** New York: John Wiley & Sons, 1974. 547 p.
- PEREIRA, J.C.R. **Análise de Dados Qualitativos.** São Paulo: Edusp/Fapesp, 1999.
- SANTOS, A.; A.; P. **Avaliação florística e estrutural de uma floresta ombrófila mista montana urbana.** 2014. 130 f. Dissertação (mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- SOUZA, A. L.; HOSOKAWA, R. T.; MACHADO, S. A. Análises multivariadas para manejo de floresta natural na reserva florestal de Linhares, Espírito Santo: análise de agrupamento e discriminante. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.14, n.2, p. 85-101, 1990.
- TAN, P.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. **Introdução ao Data Mining: Mineração de Dados.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda.; 2009.
- UBIALLI, J. **Comparação de métodos e processos de amostragem para estudos fitossociológicos e estimativas de estoque de uma Floresta Ecotonal na região norte matogrossense.** 241 t. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

## Um método heurístico para otimizar a formação de Unidades de Produção Anual no manejo de florestas nativas na Amazônia

Catherine Cristina Claros Leite <sup>1</sup>, Evandro Ferreira da Silva <sup>1</sup>; Rodrigo Freitas Silva <sup>1</sup>; Marcelo Otone Aguiar <sup>1</sup>; Evandro Órfano Figueiredo <sup>2</sup>; Mayra Luiza Marques da Silva <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UFES – Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: catherinecris@gmail.com

<sup>2</sup> EMBRAPA ACRE – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Acre.

### Resumo

Uma área de Manejo Florestal Sustentável dividida em compartimentos de igual tamanho não corresponderá a uma distribuição regular de volume, renda e espécies. Como alternativa, a formação das Unidades de Produção Anual (UPAs) pode ser modelada como um problema clássico conhecido como P-medianas. Desse modo, os objetivos deste estudo foram: 1) Apresentar um modelo de programação linear inteira binária para realizar a formação de UPAs promovendo a regulação da produção florestal e; 2) propor um método heurístico para obtenção de soluções viáveis sub-ótimas. A área de estudo consiste em uma área de manejo florestal com 1.057,41 ha de floresta tropical nativa, localizada no estado do Acre. Os dados utilizados são provenientes do inventário florestal censitário da área, em que foram selecionadas apenas as árvores da categoria explorável. Foram utilizados os preços da madeira (R\$/m<sup>3</sup> em tora) das espécies da categoria explorável para calcular a receita. O modelo proposto teve como base o modelo das p-medianas para agrupar indivíduos de valor comercial exploráveis formando as UPAs. Para resolução do modelo, desenvolveu-se um algoritmo heurístico. Foram analisados quatro cenários, com a receita e o volume variando de  $\pm 10\%$  e  $\pm 20\%$ . A variação da restrição de classe de uso da madeira foi fixada  $\pm 20\%$  em todos os cenários. Todos os cenários tinham por objetivo a formação de 4 UPAs. O método heurístico cumpriu o objetivo de formar as UPAs, agrupando as árvores de maneira otimizada e, ao mesmo tempo, regulando a produção dentro da variação permitida.

**Palavras-chave:** Manejo florestal; Regulação florestal; Programação matemática.

### 1. Introdução

Um dos maiores desafios do planejamento do recurso florestal madeireiro, conforme destacam Carvalho et al. (2015), refere-se à regulação da produção. Para Leuschner (1984), a regulação da produção florestal consiste na obtenção anual ou periódica de produtos da floresta em igual volume, igual tamanho e qualidade.

Na regulação, é comum dividir a área de produção em compartimentos de exploração a serem colhidos em determinados intervalos de tempo em um horizonte de planejamento. Contudo, o volume madeireiro de uma floresta nativa varia em função da capacidade produtiva do solo e da distribuição heterogênea das espécies (BRAZ; CARNIERI; ARCE, 2004). A divisão de uma área de Manejo Florestal Sustentável – MFS em compartimentos de igual tamanho não corresponderá a uma distribuição regular de volume, renda e espécies. Conforme Souza e Soares (2013), a distribuição espacial das Unidades de Produção Anual (UPAs) em florestas nativas é um problema que requer solução otimizada, sendo possível o emprego de técnicas de Programação Matemática (PM).

Como alternativa, a formação das UPAs pode ser modelada através da Programação Linear Inteira Binária (PLIB) como um problema clássico conhecido como P-medianas. Por se tratar de um problema do tipo NP-Hard (não-polinomial difícil), ou seja, difícil de ser solucionado devido ao grande número de combinações, seu tratamento por técnicas exatas torna-se limitado (MAPA, 2007), e assim, métodos heurísticos são normalmente utilizados para resolvê-lo (DOMÍNGUEZ; MUÑOZ, 2008; MLADENOVIC et al., 2007). Um método heurístico é um procedimento em que não há garantia da solução ótima para o problema, porém, fornece uma solução viável que se encontra pelo menos próxima da ótima, utilizando um esforço computacional considerado razoável (GOLDBARG; LUNA, 2000).

Desse modo, os objetivos deste estudo foram: 1) Apresentar um modelo de PLIB para realizar a formação de UPAs promovendo a regulação da produção florestal e; 2) Propor um método heurístico para obtenção de soluções viáveis sub-ótimas.

## 2. Material e Métodos

A área de estudo situa-se no município de Bujari, estado do Acre, Brasil. Consiste em uma área de MFS com 1.057,41 ha de floresta tropical nativa, localizada entre as coordenadas 593626,26 m W e 8957685,44 m S. O clima da região é do tipo Am, equatorial quente e úmido, com temperatura média anual em torno de 24,5° C (ACRE, 2006).

Os dados utilizados são provenientes de inventário florestal censitário da área florestal sob regime de MFS. Foram selecionadas apenas as árvores da categoria explorável, totalizando 4.237 indivíduos, com volume total de 25.437,4496 m<sup>3</sup> e volume médio de aproximadamente 6,0 m<sup>3</sup>.

Os indivíduos foram agrupados em classes de uso, a fim de promover uma distribuição homogênea na formação das UPAs. As espécies foram classificadas em madeira nobre, madeira dura intermediária e madeira branca. Os preços da madeira (R\$/m<sup>3</sup> em tora) utilizados foram obtidos em um boletim de preços de produtos agropecuários e florestais levantados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Acre (Embrapa Acre) e a Federação de Agricultura e Pecuária do Estado do Acre (FAEAC) no ano de 2013. Assim, foi possível calcular a receita individual gerada por cada uma das árvores da categoria explorável. Calculou-se a distância euclidiana de cada indivíduo em relação aos outros indivíduos da área.

### 2.1. Modelo de otimização

O problema de p-medianas é um problema clássico de localização. O objetivo é determinar os locais de  $p$  facilidades (medianas) em uma rede de  $n$  nós, de modo a minimizar a soma das distâncias entre cada nó de demanda e a mediana mais próxima (SENNE; LORENA, 2003). O modelo abaixo foi proposto com base no modelo das p-medianas para agrupar indivíduos de valor comercial exploráveis em UPAs, realizando a regulação da produção florestal com restrições de volume, receita da madeira e classes de uso.

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^n Y_j = P \quad (3)$$

$$x_{ij} - Y_j \leq 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n r_i x_{ij} \leq \frac{R}{P} \times (1 + I_r) \quad (5.1)$$

$$\sum_{i=0}^n r_i x_{ij} \geq \frac{R}{P} \times (1 - I_r) \quad (5.2)$$

$$\sum_{i=0}^n v_i x_{ij} \leq \frac{V}{P} \times (1 + I_v) \quad (6.1)$$

$$\sum_{i=0}^n v_i x_{ij} \geq \frac{V}{P} \times (1 - I_v) \quad (6.2)$$

$$\sum_{i=0}^n c_i^k x_{ij} \leq \frac{C^k}{P} \times (1 + I_c) \quad (7.1)$$

$$\sum_{i=0}^n c_i^k x_{ij} \geq \frac{C^k}{P} \times (1 - I_c) \quad (7.2)$$

$$x_{ij}, Y_j \in \{0,1\} \forall i, j = 1, \dots, n \quad (8)$$

Em que:  $i$  =  $i$ -ésima árvore;  $j$  = árvore centro da UPA;  $k$  = classe de uso;  $d_{ij}$  = distância euclidiana da árvore  $i$  para a árvore  $j$  centro da UPA;  $P$  = número total de UPAs a serem formadas;  $x_{ij}$  = variável binária (0 ou 1), que assume o valor 1 se a árvore  $i$  é ligada à árvore  $j$  centro da UPA, caso contrário, assume o valor 0;  $Y_j$  = variável binária (0 ou 1), que assume o valor 1 se a árvore  $j$  é a árvore centro da UPA, caso contrário, assume o valor 0;  $R$  = receita total da área de MFS;  $r_i$  = receita da  $i$ -ésima árvore;  $v_i$  = volume da  $i$ -ésima árvore;  $V_j$  = volume total da área de MFS;  $C^k$  = total de árvores pertencentes à classe  $k$ ;  $c^k$  = indivíduo pertencente à classe  $k$ ;  $I_r$  = taxa de variação permitida para renda;  $I_v$  = taxa de variação permitida para volume e  $I_c$  = taxa de variação permitida para classe de uso.

A função objetivo (1) busca minimizar o somatório das distâncias euclidianas entre cada árvore  $i$  e a árvore  $j$  centro de cada UPA. A restrição (2) garante que cada árvore  $i$  seja ligada apenas à uma árvore  $j$  centro dentre todas as UPAs, ou seja, cada árvore irá pertencer exclusivamente a uma única UPA. A restrição (3) estabelece o número de UPAs a serem formadas na área de MFS. A restrição (4) impõe que cada árvore  $i$  seja ligada a uma única árvore  $j$ , se esta for uma árvore centro da UPA. As restrições 5.1 e 5.2 regulam a receita de cada UPA em função da taxa de variação permitida. As restrições 6.1 e 6.2 regulam o volume de cada UPA em função da taxa de variação permitida. As árvores são distribuídas em três classes de uso, sendo as restrições 7.1 e 7.2 responsáveis por manter a proporção dessas classes nas UPAs dentro de um intervalo aceitável. A última restrição (8) afirma que as variáveis de decisão são binárias.

## 2.2. Heurística de Formação Adaptativa (HFA)

Para resolução do modelo, desenvolveu-se um algoritmo heurístico. O método heurístico proposto consiste em um procedimento aleatório, guloso e adaptativo para formar de maneira otimizada as UPAs. Sua implementação é dividida em duas partes e executadas de forma consecutiva. Primeiramente, respeitando a quantidade de unidades a serem manejadas, seleciona-se aleatoriamente as coordenadas geográficas nas quais seriam alocados os pontos centrais de cada UPA. Em seguida, formam-se as UPAs pelo agrupamento das árvores exploráveis com menor distância entre elas e a localização dos respectivos pontos centrais selecionados. A segunda fase de execução da heurística é responsável pela verificação da viabilidade da solução de acordo com a regulação pré-estabelecida para volume, receita e classe de uso. Se for uma solução inviável, iterativamente são feitas trocas nos agrupamentos de forma a permitir que a solução se adapte às restrições do modelo.

Como critério de parada considerou-se a geração de 10.000 soluções válidas para cada cenário.

## 2.3. Cenários para formação das UPAs

Foram analisados quatro cenários, com a receita e o volume variando de  $\pm 10\%$  e  $\pm 20\%$ . Cenário 1: receita e volume variando  $\pm 10\%$ ; cenário 2: receita variando  $\pm 10\%$  e volume em  $\pm 20\%$ ; cenário 3: receita variando  $\pm 20\%$  e volume  $\pm 10\%$ ; e cenário 4: receita e volume variando  $\pm 20\%$ . A variação da restrição de classe de uso da madeira foi fixada  $\pm 20\%$  em todos os cenários. Todos os cenários tinham por objetivo a formação de 4 UPAs.

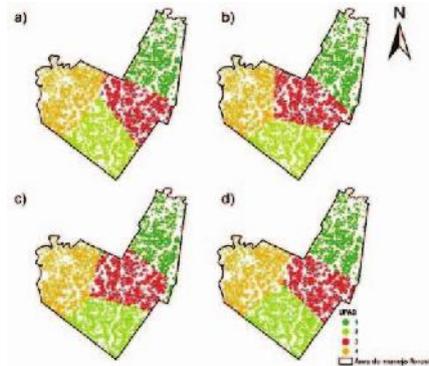
## 2.4. Avaliação da heurística

Para a avaliação do método de solução do modelo proposto, foram executadas 10 simulações para cada cenário, com o objetivo de avaliar a estabilidade da heurística proposta em obter soluções válidas e de qualidade. Ao final, foram calculadas as estatísticas descritivas das variáveis para cada cenário: média e coeficiente de variação.

## 3. Resultados e Discussão

Em relação à regulação da área florestal, a HFA foi implementada de modo a equilibrar o volume de corte, a receita obtida e o número de árvores por classes de uso em cada UPA formada. Além disso, essa regulação foi flexibilizada alocando limites máximos e mínimos às restrições do modelo como parâmetros de entrada, podendo ser ajustados de acordo com as necessidades do tomador de decisão.

Na Figura 1 é apresentada a melhor solução encontrada para cada um dos cenários avaliados após 10 processamentos consecutivos de simulação. Cada UPA formada enquadrou-se dentro dos limites máximos e mínimos de volume, receita e classe de uso. A formação das UPAs foi representada por cores diferentes com cada ponto representando uma árvore da categoria explorável.



**Figura 1** – Solução encontrada para a) cenário 1, b) cenário 2, c) cenário 3 e d) cenário 4 (Fonte: os autores).

Ao analisar os valores médios de volume e renda encontrados nos 4 cenários (Tabelas 1 e 2, respectivamente), pode-se afirmar que o método heurístico cumpriu o objetivo de formar as UPAs, agrupando as árvores de maneira otimizada e, ao mesmo tempo, regulando a produção dentro da variação permitida.

**Tabela 1** – Receita (R\$) para cada cenário avaliado. (Fonte: os autores).

	UPA	Receita $\pm 10$		Receita $\pm 20$		
		Média (R\$)	CV%	Receita média (R\$)	CV%	
Volume (m <sup>3</sup> )	$\pm 10$	Cenário 1		Cenário 2		
		1	1.149.877,07	5,66	1.115.624,83	6,78
		2	1.004.614,48	7,47	1.089.011,30	7,18
		3	1.122.296,55	4,73	1.156.188,06	7,30
	$\pm 20$	4	1.069.004,61	5,66	1.098.048,07	8,31
		Cenário 3		Cenário 4		
		1	1.101.509,19	6,87	1.127.536,68	8,25
		2	1.091.655,59	6,36	1.130.772,07	10,46
3	1.150.614,52	6,05	1.089.140,54	10,28		
4	1.115.092,95	6,98	1.111.422,96	11,55		

**Tabela 2** – Volume (m<sup>3</sup>) para cada cenário avaliado. (Fonte: os autores).

	UPA	Volume $\pm 10$		Volume $\pm 20$		
		Média (m <sup>3</sup> )	CV%	Volume médio (m <sup>3</sup> )	CV%	
Renda (R\$)	$\pm 10$	Cenário 1		Cenário 2		
		1	6.504,59	5,60	6.271,34	6,46
		2	6.351,26	6,71	6.228,33	6,97
		3	6.456,35	5,24	6.583,65	6,79
	$\pm 20$	4	6.125,25	5,99	6.354,13	8,44
		Cenário 3		Cenário 4		
		1	6.340,66	6,79	6.426,90	8,20
		2	6.225,81	6,16	6.466,53	10,17
3	6.610,01	6,05	6.218,22	9,62		
4	6.260,96	6,69	6.325,80	11,36		