

Os resultados do teste de Qui-quadrado para a espécie *Dipteryx odorata* também revelaram que não houve diferença estatística entre os volumes reais em relação aos volumes estimados pelas equações de simples entrada selecionadas. Os valores do teste foram:  $X^2_{cal} = 41,47$  e  $X^2_{cal} = 41,19$  a 99% de probabilidade ( $X^2_{crítico} = 152,03$ ;  $\alpha = 0,01$ ) para as equações de Kopezky-Gehrhaedt e Huch, respectivamente. Logo, as duas equações são indicadas para estimar o volume do fuste da espécie Cumarú para o local estudado, sendo preferível o emprego do modelo de Huch por ter demonstrado menos tendência em superestimar o conjunto de dados.

#### 4. Conclusões

*Dipteryx odorata* teve seu melhor ajuste pela equação de Huch, e pelas suas características dendrométricas (DAP, Ht e Vol.), podem ser indicados para o manejo sustentável, entretanto, pela escassez de informações, recomendam-se mais estudos de modelagem matemática voltada ao conhecimento da volumetria das essências florestais das diferentes fitofisionomias da floresta amazônica, tendo vista a grande diversidade de espécies e suas aptidões para o manejo florestal.

#### 5. Referências

AZEVEDO, G. B.; SOUSA, G. T. O.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, 2011.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas**, 3.ed. Viçosa: UFV, 2009, 548 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS ESTADO DO AMAPÁ (IEPA). **Macrodiagnóstico do estado do Amapá, primeira aproximação do ZEE**. Amapá, p.139, 2008.

ROCHA, M. B.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PRADO, W. B.; PAULA, A.; JÚNIOR, V. C. Volumetria de *Genipa americana* em plantio homogêneo no Sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 419-425, out./dez. 2015.

ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA), **Acta Amazonica**, Manaus, v. 36, n. 1, p. 107-114, 2006.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Biometria Florestal: medição e volumetria de árvores**. Lavras: UFLA, 1998.

SILVA, A. S. L.; ALMEIDA, S. S.; ROSÁRIO, C. S. Flora fanerogâmica da Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn): Caracterização dos ecossistemas e lista preliminar de espécies. In: Seminário de 10 anos de atividades da ECFPn, Caxiuanã, 2003, Belém. **Resumos...** Belém: MPEG, 2003.

SOARES, C. P. B., PAULA NETO, F., SOUSA, A. L. **Dendrometria e inventário Florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 276 p.

THIERSCH, A. **A eficiência das distribuições diamétricas para prognose de *Eucalyptus camaldulesis***. 1997. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

THOMAS, C.; ANDRADE, C. M.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. **Ciência Florestal**, Santana Maria, v.16, n.3, p.319-327. 2006.

## Alocação otimizada de torres para detecção de incêndios florestais

Marcelo Otone Aguiar<sup>1</sup>, Catherine Cristina Claros Leite<sup>1</sup>, Julyana Cristina Cândido Viana<sup>1</sup>, Harliany de Brito Matias<sup>1</sup>, Rodrigo Freitas Silva<sup>1</sup>, Evandro Orfanó Figueiredo<sup>2</sup>

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

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

### Resumo

O controle de incêndios florestais através da alocação de torres para a detecção de fumaça é considerado um sistema eficaz para o controle inicial do fogo. O desafio imposto aos pesquisadores é a inserção das torres em posições que otimizem a área de abrangência de cada uma delas. Dessa forma, o objetivo deste estudo é propor um novo método heurístico capaz de alocar de maneira otimizada as torres em áreas florestais. Concluiu-se que o algoritmo implementado foi capaz de alocar as torres respeitando todas as restrições do problema.

**Palavras-chave:** Risco de incêndios; Sistema de torres; Otimização.

### 1. Introdução

As queimadas e os incêndios florestais estão entre os principais problemas ambientais enfrentados pelo Brasil. Sabe-se também que as emissões resultantes da queima de biomassa vegetal colocam o país entre os principais responsáveis pelo aumento dos gases de efeito estufa do planeta, contribuindo, conseqüentemente, com o aquecimento global e as mudanças climáticas (IBAMA, 2016).

O número de focos de incêndios florestais no país em 2015 cresceu 27,5% quando comparado ao ano anterior, totalizando 235.629 ocorrências. Dentre tais ocorrências, o estado do Acre foi responsável por 5.400 focos de incêndios, ocasionando um aumento expressivo de 43% para o estado quando comparado ao número de ocorrências detectadas em 2014 (BORLINA FILHO, 2016).

Segundo Assis (2013) vários fatores estão ligados diretamente à ocorrência de incêndios florestais, dentre eles, as variáveis climáticas, o material combustível característico da área e o relevo, são considerados os mais relevantes. Dessa forma, estudos relativos à prevenção de incêndios florestais se tornam importantes para aqueles que trabalham em projetos de plantios comerciais e unidades de conservação.

Em consequência da dificuldade de se combater as causas que dão início ao incêndio florestal, a melhor estratégia para evitar que ocorram, é a prevenção (NOGUEIRA, et al, 2002; EUGENIO, 2014). A inserção de torres para detecção de incêndios tem como objetivo a identificação de colunas de fumaça na área observada e com isso possibilita localizar o foco do incêndio de maneira mais precisa e exata no menor tempo possível. Assim, um sistema de torres caracteriza-se como um método eficiente no combate inicial aos incêndios florestais.

Os projetos de sistemas para alocação de torres podem ser formulados por meio da Programação Matemática utilizando a Programação Linear Inteira (PLI), sendo modelados como um problema clássico de  $P$ -Medianas. O objetivo é alocar  $p$  torres de modo a minimizar a soma das distâncias de cada árvore à sua torre mais próxima. Entretanto, em função das extensas áreas de cobertura e do elevado número de árvores a serem observadas, encontrar a posição ótima para a inserção das torres torna-se um desafio. De fato, inviabiliza-se a resolução deste problema através de métodos exatos como PLI, Programação Dinâmica ou qualquer outra forma de busca exaustiva pela solução ótima.

Logo, métodos alternativos de busca são requeridos a fim de encontrar soluções viáveis para o problema, mesmo que estas não tenham garantia da otimalidade. Assim, métodos heurísticos são normalmente utilizados para resolução desse problema (CHURCH; BEAMR, 2008; DOMÍNGUEZ; MUÑOZ, 2008).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo propor um algoritmo heurístico capaz de alocar torres de incêndios dentre milhares de posições possíveis em busca de soluções de qualidade, ou seja, minimizando o máximo possível a distância das árvores às torres inseridas. Adicionalmente, um sistema de informação foi desenvolvido para a obtenção da solução de acordo com a quantidade de torres que deseja-se inserir na área estudada.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Área de Estudo

A área de estudo situa-se no município de Bujari, estado do Acre, Brasil. Consiste em um bloco florestal com uma área de 1.057,41 ha de floresta tropical nativa, localizada entre as coordenadas 593626,26 m W e 8957685,44 m S (Figura 1). Na região, existem predominantemente dois tipos de floresta: Floresta Ombrófila Densa e a Floresta Ombrófila Aberta, ambas com uma grande diversidade de formações vegetais (ACRE, 2006). No total foram inventariadas 4.237 árvores e considerou-se a localização geográfica de cada uma delas como uma coordenada possível para inserção de uma torre de detecção de incêndios florestais.

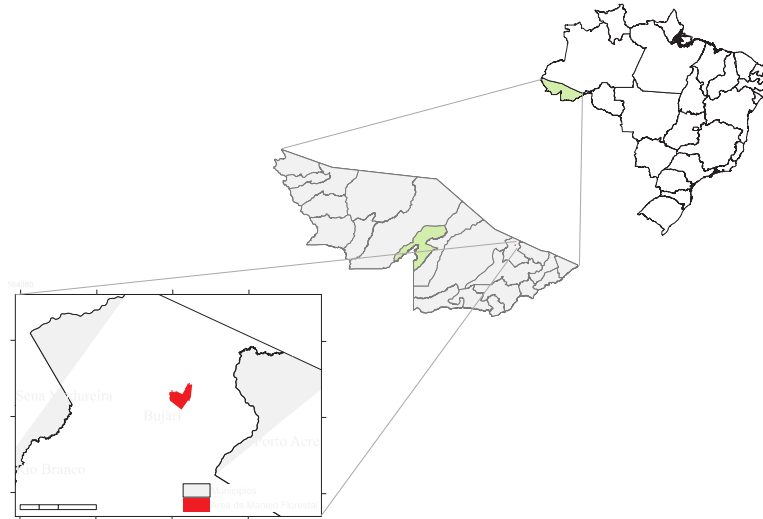


Figura 1 – Área de estudo (Fonte: os autores).

### 2.2. Modelo matemático

A modelagem do problema de  $P$ -Medianas voltado para alocação de torres para detecção de incêndios florestais é descrito matematicamente da seguinte forma (ARAKAKI, 2002; JUVANHOL, 2015):

$$\text{Função Objetivo: } \textit{Minimizar} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

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

$$\sum_{j=1}^n y_{jj} = p \quad (3)$$

$$d_{ij} y_j \leq DM \quad (4)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}$$

(5)

Em que:  $d_{ij}$  é a distância da árvore  $i$  à torre  $j$ ;  $y_{ij} = 1$  se a árvore  $i$  está alocada à torre  $j$  e  $y_{ij} = 0$  caso contrário;  $y_{jj} = 1$  se o nó  $j$  é uma torre e  $y_{jj} = 0$  caso contrário;  $p$  é o número de torres a serem alocadas;  $n$  é o número total de posições em que as torres podem ser alocadas, onde cada posição corresponde a localização de uma árvore na área de estudo;  $DM$  é a distância máxima de uma árvore à torre. A função objetivo (1) busca minimizar a soma das distâncias das árvores até as suas respectivas torres associadas. A restrição (2) garante que cada árvore seja alocada a somente uma torre. A restrição (3) determina o número exato de torres a serem inseridas. A restrição (4), por sua vez, garante uma distância máxima de uma árvore até uma torre e, por último, a restrição (5) garante integralidade à solução.

### 2.3 O método proposto

O algoritmo proposto funciona da seguinte maneira. Primeiramente (Passo 1), insere-se como parâmetro de entrada as coordenadas das  $i$  diferentes posições em que as torres podem ser alocadas, a quantidade  $p$  de torres a serem inseridas e, por último, a distância máxima  $DM$  de um ponto até a torre mais próxima. Como exemplo, supondo que se tenha 4.237 possíveis posições para a inserção de 2 torres em que a distância máxima de uma posição (árvore) até a torre mais próxima seja de 2 km.

Na sequência (Passo 2), o algoritmo seleciona aleatoriamente  $p$  posições dentre as 4.237 possíveis de serem inseridas as torres, neste exemplo, 2 posições serão selecionadas. Posteriormente (Passo 3), verifica-se a distância de cada árvore que compõe a área de estudo até a sua torre mais próxima, somando todas as distâncias encontradas de cada uma das árvores até à sua respectiva torre. Assim, obtém-se uma solução para o problema e um resultado para a função objetivo.

Em seguida (Passo 4), é analisado se alguma das distâncias encontradas não respeita a restrição de distância máxima. Caso isso aconteça, a solução é caracterizada como inválida e descartada. De qualquer forma, esse algoritmo é executado  $k$  vezes (do Passo 2 ao Passo 4) em busca de uma solução viável que minimize função objetivo, ou seja, a somatória das distâncias.

A estratégia gulosa (CORMEN, 2012) é utilizada neste algoritmo ao associar as árvores à torre mais próxima a ela, parecendo ser a melhor escolha a princípio. Não se analisa, contudo, as consequências que essas associações implicarão na solução final do problema (TOSCANI; VELOSO, 2012). É válido destacar ainda que algoritmos gulosos são comumente empregados em problemas de otimização de recursos florestais como em Silva et al. (2015) e Resende e Werneck (2004).

### 3. Resultados e Discussão

Para as simulações executadas foram considerados 3 cenários distintos, variando de 1 a 3 a quantidade de torres alocadas na área de estudo. O número de posições distintas avaliadas para a inserção das torres permaneceu fixo em 4237 posições para os 3 cenários e a distância máxima permitida de uma torre à árvore mais distante dela variou de 2 a 3,5 km.

O algoritmo foi executado 100.000 vezes para cada cenário e, ao final, mostrado o resultado que atendesse a todas as restrições e minimizasse a função objetivo. Na Tabela 1 é possível visualizar os resultados encontrados após o término das simulações. Informações relativas ao relevo não foram consideradas nesse trabalho.

Para o cenário 1, por exemplo, dentre as 4237 localizações possíveis para a inserção de 1 torre, o algoritmo determinou que a melhor posição é a de número 2972 minimizando, dessa forma, a função objetivo. Além disso, respeitando a restrição do problema, determinou-se que a distância máxima de uma árvore a torre fosse de 3,5 km.

**Tabela 1** – Coordenadas para a inserção das torres na área de estudo para todos os cenários avaliados. (Fonte: os autores).

|           | Informações de entrada     |        | Coordenada das Torres           | Maior distância (m) | Função Objetivo (m) |
|-----------|----------------------------|--------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| Cenário 1 | Nº de torres               | 1      |                                 |                     |                     |
|           | Qtd. de posições avaliadas | 4237   | 1º: 2972                        | 3.174,97            | 5.464.208,32        |
|           | Distância máxima permitida | 3,5 km |                                 |                     |                     |
| Cenário 2 | Nº de torres               | 2      |                                 |                     |                     |
|           | Qtd. de posições avaliadas | 4237   | 1º: 2653<br>2º: 589             | 1.986,03            | 3.817.673,28        |
|           | Distância máxima permitida | 2 km   |                                 |                     |                     |
| Cenário 3 | Nº de torres               | 3      |                                 |                     |                     |
|           | Qtd. de posições avaliadas | 4237   | 1º: 3622<br>2º: 2126<br>3º: 593 | 1.760,39            | 3.037.796,86        |
|           | Distância máxima permitida | 2 km   |                                 |                     |                     |

O tempo médio de processamento do algoritmo implementado para cada cenário foi 60 segundos, levando em consideração sua execução 100.000 vezes. Esse tempo de processamento pode ser maior ou menor em função do número de vezes que o algoritmo é executado. Como a implementação do método é em parte aleatória, quanto mais vezes ele for executado, maior será a probabilidade de se gerar melhores resultados.

#### 4. Conclusões

Por fim, conclui-se que o método proposto é eficaz por gerar bons resultados e eficiente devido ao pequeno tempo que leva para processá-lo. Resultados melhores poderiam ser encontrados caso o algoritmo fosse executado mais vezes em cada cenário. Contudo, o custo disso seria um maior tempo de processamento e obtenção dos resultados. Como trabalhos futuros, propõe-se a utilização de instâncias menores para uma avaliação precisa da otimalidade deste algoritmo quando comparado a métodos exatos alternativos como a programação linear.

#### Referências

ARAKAKI, R. G. I. **Heurística de localização-alocação para problemas de localização de facilidades**. São José dos Campos, SP: INPE, 2002. 72 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2002.

ASSIS, F. R. V. **Uso de geotecnologias na locação espacial de torres para detecção de incêndios florestais**. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Campina Grande, Patos, 2013. 43 f.

BORLINA FILHO, V. Número de incêndios florestais cresce 27,5% no país. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 5 jan. 2016, Cotidiano. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2016/01/1725892-numero-de-incendios-florestais-cresce-27-no-pais.shtml>>. Acesso em: 25 ago. 2016.

CHURCH, R. L. BEAMR: An exact and approximate model for the p-median problem. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 2, p. 417-426, 2008.

CORMEN, T. H. et al. **Algoritmos: teoria e prática**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2012. 944 p.

DOMÍNGUEZ, E.; MUÑOZ, J. A neural model for the p-median problem. **Computers & Operations Research**, Oxford, v. 35, n. 2, p. 404-416, 2008.

EUGENIO, F. C. **Geotecnologias na alocação de torres de observação de incêndios florestais.** Curitiba, PR: UFPR, 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. Incêndios Florestais. **IBAMA**, Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/prevfogo>>. Acesso em: 25 ago. 2016.

JUVANHOL, R. S. et al. Uso de geotecnologias e programação matemática na alocação de torres de incêndios. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 47., 2015, Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas: UFPE, 2015.

NOGUEIRA, G. S.; RIBEIRO, G. A.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SILVA, E. P. Escolha de locais para instalação de torres de detecção de incêndio com auxílio do SIG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 363-369, 2002.

RESENDE, M. G. C.; WERNECK, R. F. A hybrid heuristic for the p-median problem. **Journal of Heuristic**, Boston, v.10, n. 1, p. 59-88, 2004.

SILVA, R. F. et al. Calibração de uma heurística de construção por partes para otimizar o sortimento florestal em plantios de *Pinus taeda L.* In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 47. 2015. Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas: UFPE, 2015. p. 592-602.

TOSCANI, L. V.; VELOSO, P. A. S. **Complexidade de algoritmos: análise, projeto e métodos.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.