



ADRIANA ZANELLA MARTINHAGO

**OTIMIZAÇÃO PARA A LOCAÇÃO DE PÁTIOS
DE ESTOCAGEM PARA EXPLORAÇÃO DE
IMPACTO REDUZIDO NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

LAVRAS – MG

2012

ADRIANA ZANELLA MARTINHAGO

**OTIMIZAÇÃO PARA A LOCAÇÃO DE PÁTIOS DE ESTOCAGEM PARA
EXPLORAÇÃO DE IMPACTO REDUZIDO NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo e Colheita Florestal, para a obtenção do título de Doutora.

Orientador

Dr. Luís Marcelo Tavares de Carvalho

LAVRAS – MG

2012

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Martinhago, Adriana Zanella.

Otimização para a locação de pátios de estocagem para
exploração de impacto reduzido na Amazônia brasileira / Adriana
Zanella Martinhago. – Lavras : UFLA, 2012.

162 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Luis Marcelo Tavares de Carvalho.

Bibliografia.

1. Planejamento florestal. 2. Geotecnologias. 3. Métodos de
otimização. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.92

ADRIANA ZANELLA MARTINHAGO

**OTIMIZAÇÃO PARA A LOCAÇÃO DE PÁTIOS DE ESTOCAGEM PARA
EXPLORAÇÃO DE IMPACTO REDUZIDO NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo e Colheita Florestal, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 31 de julho de 2012.

Dr. Lucas Rezende Gomide	UFLA
Dr. José Márcio de Mello	UFLA
Dr. Cristiano Leite e Castro	UFLA
Dr. Ricardo Martins de Abreu Silva	UFPE



Phd. Luís Marcelo Tavares de Carvalho
Orientador

LAVRAS – MG

2012

Aos meus amores, Douglas e Pedro

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Em todas as fases da minha vida nunca estive sozinha, pessoas importantes fizeram e continuam fazendo parte da minha caminhada. Ao final deste trabalho, muitos me ajudaram a atingir este objetivo: Deus, minha família, amigos, professores, profissionais e tantos outros.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciências Florestais (DCF), pela oportunidade concedida para realização do doutorado.

Agradeço ao meu orientador, professor Luís Marcelo Tavares de Carvalho, por acreditar no meu potencial, pela amizade, companheirismo, confiança, paciência e pelos ensinamentos fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos coorientadores, professores Lucas Rezende Gomide e Ricardo Martins Abreu e Silva, pelas sugestões e discussões de relevante importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos de LEMAF, pela amizade e companheirismo demonstrados neste período.

Ao Evandro Orfanó Figueiredo, da Embrapa Acre, pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pelo suporte durante o treinamento para finalização do doutorado e aos meus companheiros de trabalho, pela ajuda nos momentos críticos e decisivos, tanto na realização do trabalho, como na formação profissional e pessoal.

À minha mãe, pela dedicação, ao meu pai pela compreensão e ao meu irmão e minhas irmãs pela amizade e carinho.

Ao meu esposo, Douglas, que me inspirou nos momentos mais difíceis desta jornada e ao meu filho Pedro, que foi uma benção na minha vida.

A Deus, pela vida, por ter me dado forças para vencer mais esta batalha e por colocar no meu caminho todas estas pessoas maravilhosas.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO GERAL

As florestas tropicais possuem uma grande diversidade de espécies de valor comercial. Com isso a atividade de retirada desses recursos florestais é intensa. Na exploração florestal a operação de extração é uma das atividades que ocasiona mais gastos. Desta forma, esse estudo tem como objetivo apresentar uma metodologia que integra o uso de geotecnologias e métodos de otimização para auxiliar na exploração florestal visando locação ótima de pátios de estocagem de madeira. No primeiro artigo foram utilizados os problemas P-Mediana (PM) e sua variação P-Mediana Capacitado (PMC) e os métodos de otimização utilizados foram à programação linear inteira (PLI) e uma metaheurística híbrida. A partir do resultado das restrições geradas pelo sistema de informação geográfica foram gerados comparativos entre os resultados dos métodos de otimização. Os resultados mostram que a metaheurística apresenta valores muito próximos e muitas vezes iguais ao ótimo apresentado pela PLI com a vantagem do tempo de processamento ser bem menor. Uma desvantagem de se usar o PM ou o PMC é que o número de pátios a ser alocado deve ser passado como parâmetro de entrada no modelo. No segundo artigo foi apresentado um novo modelo matemático para otimizar o planejamento dos pátios de estocagem e resolver o problema encontrado no primeiro artigo. O resultado apresentado se assemelha aos resultados apresentados em campo. Em alguns casos o modelo apresentou resultados melhores. Os resultados encontrados no estudo, mesmo não validados em campo, foram considerados satisfatórios no planejamento da extração de madeira, já que foram utilizados métodos com embasamento científico e não mais intuitivos ou empíricos como é realizado atualmente, e que facilitariam as atividades de campo.

Palavras-chave: Planejamento florestal. Métodos de Otimização. Geotecnologias

GENERAL ABSTRACT

Tropical forests present a high level of species diversity with commercial value. Thus, the removal of these forest resources has been intense. During forest exploration, the extraction phase is one of the most impacting and expensive activities. Therefore, the objective of this study was to present a methodological framework that integrates geotechnologies and optimization methods in order to locate log landings for reduced impact logging in the Amazon. In the first study, the P-Median problem (PM) and its variation, the Capacitated P-median (CPM), were tackled using integer linear programming (ILP) and a hybrid metaheuristic. Spatial constraints were generated using a geographic information system to be input to the optimization processes. The results show that metaheuristic present values very close and sometimes equal to optimum values present by ILP, with the advantages of shorter process in time. A disadvantage of tracking log landing location as PM or CPM problem is that the number of yards must be defined in advance as input to the model. Hence the second study, a new mathematical model is introduced to optimized log landings planning. The results were similar to what was implemented in the field. The results were considered efficient for log landing planning and based on scientific methods rather than intuitive and empiric approaches operationally used.

Keywords: Forest Planning. Optimization Methods. Geotechnology.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1	Representação vetorial em duas dimensões	31
Figura 2	Representação da estrutura matricial	31
Figura 3	Estrutura geral de um SIG	33
Figura 4	Localização da primeira área de estudo no estado do Pará.....	48
Figura 5	Detalhes da Fazenda Pica-Pau localizada no estado do Pará	49
Figura 6	Divisão das unidades de trabalho na Fazenda Pica-Pau localizada no estado do Pará	50
Figura 7	Localização das árvores de acordo com o Inventário Florestal da Fazenda Pica-pau localizada no estado do Pará.....	51
Figura 8	Localização da área de estudo no estado do Acre	52
Figura 9	Mapa detalhado da área de estudo localizada na Fazenda Canary no estado do Acre.....	53
Figura 10	Localização das árvores inventariadas na área de estudo da Fazenda Canary localizada no estado do Acre.....	54
Figura 11	Divisão da área da Fazenda Canary localizada no estado do Acre em 16 unidades de trabalho	55
Figura 12	Resultado do passo (1) para UT 14 da área localizada no estado do Pará. (a) Camada de Área de Preservação Permanente e (b) Camada de Áreas Cipoálicas.....	58

Figura 13	Resultado do passo (1) para unidade de trabalho 3 da área localizada no Acre. (a) Camada de Área de Preservação Permanente e (b) Camada de Áreas Restritas	59
Figura 14	Resultado do passo (2) para unidade de trabalho 14 da área Pará.....	60
Figura 15	Resultado do passo (2) para unidade de trabalho 3 da área Acre..	60
Figura 16	Resultado do passo (3) para a área localizada no estado do Pará..	61
Figura 17	Resultado do passo (3) para a área Acre.....	62
Figura 18	Resultado do passo (5) para a unidade de trabalho 14 da área Pará.....	64
Figura 19	Resultado do passo (5) para a unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre	65
Figura 20	Exemplo de como foi gerada a camada de possíveis pátios (a) e a numeração dos pátios (b) para a unidade de trabalho 14 da área Pará	66

SEGUNDA PARTE-ARTIGOS

ARTIGO 1

Figura 1	Localização da área de estudo. (a) Área localizada no estado do Pará e (b) Área localizada no estado do Acre	88
Figura 2	Detalhes da Fazenda Pica-Pau (a) e divisão numerada das UTs utilizadas neste estudo (b).....	89
Figura 3	Detalhes da Fazenda Canary (a) e a divisão das unidades de trabalho que foram utilizadas neste estudo	90

Figura 4	Resultado da análise geográfica para UT 14 localizada no estado Pará (a) e resultado da análise geográfica para UT 3 localizada no estado do Acre (b)	99
Figura 5	Resultado análise geográfica com a distribuição dos possíveis pátios para a UT 14 na área localizada no estado do Pará (a) e para a UT3 na área localizada no estado do Acre (b).....	100
Figura6	Resultado da análise geográfica com a localização das árvores para exploração na UT 14 da área localizada no estado do Pará (a) e na UT3 da área localizada no estado do Acre (b).....	101
Figura 7	Localização geográfica dos pátios e suas respectivas árvores para o problema PM na área localizada no estado do Pará	109
Figura 8	Localização geográfica das árvores e seus respectivos pátios resultantes do problema PM para a área localizada no estado do Acre.....	115
Figura 9	Distribuição geográfica dos pátios e suas respectivas árvores resultantes do problema PMC para a área localizada no estado do Pará.....	120
Figura 10	Localização geográfica das árvores e pátios resultantes do problema PMC para a área localizada no estado do Acre	125

ARTIGO 2

Figura1	Localização da UPA 05 na Fazenda Canary localizada no município de Bujari no estado do Acre	137
Figura 2	Divisão da área de estudo em unidades de trabalho	138

Figura 3	Resultado da análise geográfica com os melhores locais para o empilhamento de madeira da unidade de trabalho 3	145
Figura 4	Localização dos possíveis pátios para empilhamento de madeira na unidade de trabalho 3.....	146
Figura 5	Localização as árvores a serem exploradas na unidade de trabalho 3	147
Figura 6	Resultado do novo modelo e o resultado implantado em campo para a unidade de trabalho 3	152
Figura 7	Localização dos pátios retornados pelo modelo (a) e localização dos pátios de acordo com o plano de manejo (b) na área de estudo	158

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

Tabela 1	Classificação utilizada nas camadas APP, Áreas Cipoólicas e Áreas restritas.....	57
Tabela 2	Classificação utilizada na camada de inclinação.....	61
Tabela 3	Tabela de reclassificação do resultado da análise geográfica	63

SEGUNDA PARTE-ARTIGOS

ARTIGO 1

Tabela 1	Número de variáveis e restrições da área localizada no estado do Pará.....	102
Tabela 2	Número de variáveis de decisão e restrições das repartições da área localizada no estado do Acre	103
Tabela 3	Comparação entre o método exato e o método aproximado para resolver o problema PM nas unidades de trabalho da área localizada no estado do Pará	105
Tabela 4	Comparação entre as distâncias resultantes dos métodos de otimização para o problema PM nas unidades de trabalho da área localizada no estado do Pará.....	108
Tabela 5	Comparação entre o método exato e o método aproximado para resolução do problema PM na área localizada no estado do Acre .	111
Tabela 6	Tabela de comparação das distâncias resultantes do método exato e do método aproximado dos problemas PM na área localizada no estado do Acre.....	114

Tabela 7	Comparação entre os métodos de otimização para o problema PMC na área localizada no estado do Pará	117
Tabela 8	Comparação entre as distâncias resultantes no problema PMC para a área localizada no estado do Pará	119
Tabela 9	Comparação dos resultados do método exato e do método aproximado para o problema PMC da área localizada no estado do Acre	121
Tabela 10	Comparação entre as distâncias mínimas e máximas de arraste das árvores em seus respectivos pátios resultantes do problema PMC para a área localizada no estado do Acre	124

ARTIGO 2

Tabela 1	Número resultante de variáveis e restrições por unidade de trabalho	149
Tabela 2	Resultado do modelo proposto para as unidades de trabalho da área de estudo.....	150
Tabela 3	Distâncias mínimas e máximas de arraste das árvores para seus respectivos pátios de acordo com o resultado do modelo proposto	151
Tabela 4	Comparação entre os custos encontrados no modelo e os custos implantados em campo para área de estudo.....	154
Tabela 5	Comparação entre as distâncias euclidianas resultantes do modelo proposto e as distâncias euclidianas calculadas de acordo com o plano de manejo da área de estudo	156

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	17
1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa e Objetivo	20
1.2	Aspectos inovadores apresentados nesta Tese	22
1.3	Organização da Tese	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1	Exploração de Impacto Reduzido	24
2.1.1	Fase Pré-Exploratória	26
2.1.2	Fase exploratória	28
2.1.3	Fase Pós-exploratória	28
2.2	Geotecnologias	30
2.3	Métodos de Otimização	33
2.3.1	Descrição do Problema das P-Medianas (PM)	35
2.3.2	Formulação matemática do problema PM	36
2.3.3	Descrição do Problema das P-Medianas Capacitado (PMC)	37
2.3.4	Formulação Matemática do PMC	38
2.3.5	Resolução dos Problemas PM e PMC	39
2.3.5.1	Métodos Exatos	40
2.3.5.2	Métodos Heurísticos e Metaheurísticos	41
3	METODOLOGIA GERAL	48
3.1	Área de Estudo	48
3.2	Métodos	56
3.2.1	Análise Geográfica	56
3.2.2	Métodos de Otimização	67
4	Conclusão	68
	REFERÊNCIAS	70
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	81
	ARTIGO 1 Comparação de métodos de otimização para a locação ótima de pátios de estocagem de madeira	81
1	INTRODUÇÃO	83
2	MATERIAL E MÉTODOS	88
2.1	Área de estudo	88
2.2	Obtenção dos dados	90
2.3	Métodos	91
2.3.1	Análise Geográfica	91
2.3.2	Métodos de Otimização	92
2.3.3	Avaliação do desempenho da metaheurística	98
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
3.1	Resultados da análise geográfica	99

3.2	Resultado dos métodos de otimização	101
4	CONCLUSÃO	127
4.1	Trabalhos Futuros	128
	REFERÊNCIAS.....	129
	ARTIGO 2 Desenvolvimento de um modelo matemático para definição do número ótimo de pátios de estocagem.....	132
1	INTRODUÇÃO	134
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	137
2.1	Área de estudo e obtenção dos dados	137
2.2	Métodos.....	139
2.2.1	Modelo matemático.....	140
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	145
3.1	Resultados da análise geográfica	145
3.2	Resultado do modelo matemático.....	148
4	CONCLUSÃO	159
	REFERÊNCIAS.....	160

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A floresta Amazônica, a mais extensa das florestas naturais existentes no globo, ocupa uma área de aproximadamente $5,5 \times 10^6$ km², sendo que a parte brasileira abrange $3,85 \times 10^6$ km², o que representa 45% do território nacional.

A Amazônia brasileira é constituída por diversos tipos de vegetação e por uma grande diversidade de espécies. É um dos maiores reservatórios naturais da diversidade biológica do mundo (OLIVEIRA; AMARAL, 2004). Abriga recursos florestais imensos: um terço das florestas tropicais do mundo, com volume estimado de 60 bilhões de metros cúbicos de madeira em tora, cujo valor econômico potencial pode alcançar quatro trilhões de reais em madeira serrada (BARROS; VERÍSSIMO, 2002).

Os mais de 25 milhões de metros cúbicos de madeira em tora produzidos anualmente na Amazônia representam 85% da produção nacional de madeira nativa (LENTINI; VERÍSSIMO; PEREIRA, 2006). Deste total, 17% vêm de planos de manejo florestal sustentável (PMFS), 20% de desmatamentos autorizados e 63% sem origem definida (HIGUCHI, 2006). A indústria madeireira regional é responsável por 15% do PIB da Amazônia, gera uma renda bruta de US\$ 2,5 bilhões e emprega cerca de 5% da população economicamente ativa (LENTINI; VERÍSSIMO; COBRA, 2003).

O manejo florestal é a principal atividade econômica que possibilita a manutenção da cobertura natural. O estímulo ao manejo e ao interesse pela floresta é o fator decisivo para inibição de usos da terra que impliquem em desflorestamento e queimadas (BRAZ et al., 2007).

Segundo Gama, Bentes-Gama e Scolforo (2005) a finalidade do manejo florestal é conseguir que as florestas forneçam continuamente benefícios

econômicos, ecológicos e sociais, mediante um planejamento mínimo para o aproveitamento dos recursos madeireiros e não madeireiros disponíveis. Para tanto, o manejo florestal sustentável, é um processo de gerenciamento e planejamento florestal, no sentido de analisar as melhores ações para uma resposta socioeconômica e ambiental favorável a médio e longo prazo.

Apesar destes fatores, o manejo florestal tropical ainda é visto com restrições, pelos produtores e organizações não governamentais.

Segundo Green peace (1999), 80% da derrubada de árvores na Amazônia é considerada ilegal. Em muitos casos, os planos de manejo florestal não são usados como deveriam e são criados apenas para satisfazer requerimentos legais.

Visando dar suporte a um modelo sustentável que possa atender a demanda mundial de madeira serrada, foram desenvolvidas uma série de diretrizes técnicas para Exploração de Impacto Reduzido (EIR) em florestas da Amazônia brasileira (SABOGAL et al., 2006), as maiores fornecedoras de madeira para os mercados internacionais.

Essas diretrizes consideram um conjunto mínimo de práticas a serem aplicadas durante o processo de colheita da madeira, adaptadas às operações individuais nas fases de pré-exploração, exploração e pós-exploração. Uma diretriz fundamental é a realização de um planejamento detalhado de cada fase visando baixo impacto ambiental e redução nos custos totais da colheita de madeira (PINTO et al., 2002).

Essas diretrizes foram baseadas em experiências já existentes com a exploração de madeira na Amazônia brasileira, bem como em consultas feitas a profissionais em exercício neste campo de trabalho, pesquisadores e representantes do governo e ao Código Modelo da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) para práticas de exploração florestal.

A Exploração de Impacto Reduzido (EIR) é um sistema que utiliza as melhores técnicas de extração disponíveis e que reduzem os danos às florestas residuais, o desgaste do solo e erosão, protege a qualidade da água, atenuam os riscos de incêndios e potencialmente ajudam a manter a regeneração e proteção da diversidade biológica (BARRETO et al., 1998) (UHL et al., 1997).

As atividades da colheita podem ser divididas em três fases básicas: corte, extração e transporte, sendo que, a operação de extração é uma das atividades que ocasiona mais gastos. Quando a colheita é realizada sem planejamento acarreta sérios danos à estrutura da floresta.

Para redução dos custos das atividades de colheita, várias ferramentas e técnicas podem ser utilizadas, em especial ferramentas como Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento remoto (SR), Sistema de Posicionamento Global (GPS) e técnicas de Pesquisa Operacional (PO).

A pesquisa operacional dentro da ciência florestal tem cada vez mais seu uso destacado em trabalhos para otimizar o planejamento. Berger et al. (2003) usaram a programação linear para minimizar os custos de transporte de madeira de uma empresa florestal que possui várias origens e um único destino. O custo da empresa teve uma redução de 18,33% indicada pelo modelo.

Braz, Carnieri e Arce (2004) apresentaram um modelo matemático que auxilia no planejamento e distribuição dos talhões em um pequena propriedade da floresta tropical. O modelo matemático resultou em um novo conceito de talhão e garantiu o equilíbrio do rendimento anual para o pequeno proprietário.

Malinovski et al. (2008) desenvolveram para florestas plantadas, através de técnicas matemáticas e de funcionalidades disponíveis no Sistema de Informações Geográficas, uma ferramenta tecnológica capaz de calcular e otimizar a distância média de extração (DME) de madeira com *forwarder* (trator que arrasta a tora da árvore até o pátio de estocagem), em diferentes tamanhos e

formatos de talhões. Os resultados mostraram que o modelo otimizado desenvolvido é eficiente e flexível.

Lima et al. (2011) apresentaram uma proposta metodológica que utiliza geotecnologias e pesquisa operacional para determinar os melhores locais para o empilhamento de madeira e a quantidade de madeira alocada em cada pilha para florestas plantadas e com um número pequeno de variáveis. A pesquisa operacional foi utilizada neste trabalho através de um modelo matemático simples. O trabalho mostrou que a integração da geotecnologia com a pesquisa operacional se mostrou muito úteis para o planejamento das atividades de extração de madeira em florestas plantadas.

Gomide, Moura e Melo (2011) usaram programação linear inteira como suporte ao microplanejamento da exploração de florestas inequiâneas (florestas onde as árvores tem diferentes idades), considerando o conceito de impacto reduzido e o uso do problema clássico de localização de instalações P-Mediana Capacitado modificado. Este modelo seleciona as árvores diferentes do modelo apresentado neste trabalho que utilizou as árvores para exploração selecionadas no inventário florestal. Outra diferença está no limite volumétrico, que neste trabalho teve uma variação de $\pm 5\%$ da capacidade estabelecida. Os resultados mostraram que este tipo de modelo auxilia o microplanejamento e reduz o impacto na floresta.

1.1 Justificativa e Objetivo

Foram encontrados alguns trabalhos que utilizam a pesquisa operacional para auxiliar no planejamento da colheita florestal (ARCE, 1997), (BERGER et al., 2003), (BRAZ; CARNIERE; ARCE, 2004), (FLISBERG; FORSBERG; RÖNNQVIST, 2007), (CONTRERAS; CHUNG, 2007). Malinovski et al.

(2008), (GOMIDE; MOURA; MELO, 2011) e Lima et al. (2011) utilizaram a pesquisa operacional em conjunto com os sistemas de informações geográficas.

Foram encontrados também trabalhos que utilizam heurísticas e metaheurísticas na engenharia florestal (SILVEIRA; MORABITO, 2002), (RODRIGUES et al., 2004), (PILEGGI; MORABITO; ARENALES, 2005), (MENON, 2005) e (GOMIDE, 2009), mas não foram encontrados trabalhos que utilizam heurísticas ou metaheurísticas como métodos de otimização no planejamento da criação de pátios de estocagem em florestas nativas, que atualmente é realizado de forma empírica, sem nenhuma otimização.

Problemas de localização podem ser usados para otimizar a localização dos pátios de estocagem. O termo instalação pode ser substituído por pátios. Em geral, várias instalações serão localizadas, que por sua vez, serão alocados aos seus clientes, que podem ser as árvores. Desta forma tais problemas são também conhecidos como problemas de localização-alocação. A maioria dos problemas de localização de instalação é considerada de difícil solução, alguns desses problemas pertencem a classe NP-difícil (*NP-hard*) (GAREY; JOHNSON, 1979), assim, o esforço computacional para a sua solução cresce exponencialmente. Deste modo, é praticamente impossível resolver problemas reais de grande porte através dos métodos exatos, devido à inviabilidade temporal, por isso a necessidade da utilização de heurísticas/metaheurísticas para resolver o problema.

O objetivo geral com este trabalho é utilizar métodos de otimização em conjunto com sistema de informação geográfica para auxiliar a locação de pátios de estocagem em florestas naturais, considerando o conceito de impacto reduzido.

As perguntas científicas que serão respondidas no decorrer do trabalho são:

- a) Seria o emprego de métodos heurísticos mais adequados do que os métodos de Programação Linear Inteira na solução do problema de locação de pátios na Amazônia brasileira, devido à natureza combinatória desse problema?
- b) Como definir o número ótimo de pátios?

Este trabalho pretende auxiliar no planejamento da colheita de florestas nativas que utilizam o conceito de corte seletivo e visa diminuir os custos e principalmente o impacto ambiental durante a criação dos pátios de estocagem para a exploração de florestas nativas.

1.2 Aspectos inovadores apresentados nesta Tese

Um dos aspectos inovadores é o uso de heurística para locação de pátios de estocagem e a comparação de sua eficiência e eficácia com uma solução ótima para áreas com um número de variáveis considerado alto para modelos matemáticos determinísticos.

Outro aspecto é a criação de um novo modelo matemático que apresenta o número ótimo de pátios de estocagem considerando os custos de construção de pátios e os custos de arraste da tora até o pátio de estocagem criado.

1.3 Organização da Tese

O trabalho está dividido em três capítulos:

No capítulo 1 é apresentada a contextualização do tema abordado na tese. Na seção 2 será apresentado o referencial teórico que tem o objetivo de trazer definições e termos utilizados nos capítulos subsequentes como

Exploração de Impacto Reduzido, Geotecnologias e Métodos de Otimização. Na seção 3 apresenta a metodologia geral e detalhada utilizada neste trabalho.

Os capítulos 2 e 3 trazem dois artigos científicos que serão submetidos para publicação em periódicos de divulgação científica.

No primeiro artigo é apresentado o uso de problemas de localização P-Mediana e P-Mediana Capacitada em conjunto com um Sistema de Informação Geográfica para apresentar os melhores locais para criação dos pátios de estocagem em uma área de floresta nativa. Neste artigo foram utilizados e comparados dois métodos de otimização (exato e heurístico) na resolução dos problemas de localização. O resultado encontrado foi satisfatório quando comparado com o que foi implantado em campo. A desvantagem encontrada neste modelo está relacionada ao parâmetro de entrada P que é o número de pátios que devem ser criados na área. O ideal seria que o modelo apresentasse também o número de pátios ótimo para área desejada.

No segundo artigo é apresentado um novo modelo matemático para otimizar o planejamento dos pátios de estocagem e resolver o problema encontrado no primeiro artigo. Este novo modelo apresenta não apenas a localização dos melhores pátios e a ligação árvore pátio que foi apresentada no primeiro artigo, mas também o número de pátios ótimos que deverão ser construídos na área explorada. O resultado apresentado se assemelha aos resultados apresentados em campo e alguns casos o método apresentou resultados melhores.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O manejo florestal é a principal atividade econômica que possibilita a manutenção da cobertura florestal natural.

Segundo Wyatt-Smith (1987) manejo florestal significa explorar a floresta de modo a prover rendimento sustentado dos produtos florestais, sem destruir ou alterar a composição e estrutura da floresta como um todo.

Dentro do manejo florestal, a colheita de madeira é a fase mais importante economicamente devido a sua participação no custo final do produto e os riscos de perda envolvidos nessa atividade. A colheita florestal é um conjunto de operações realizadas no maciço florestal que visa preparar e transportar a madeira até o seu destino, tendo por finalidade transformá-la em produto final (TANAKA, 1986).

Nas últimas décadas as pesquisas em manejo florestal foram orientadas para reduzir os impactos da exploração sobre a floresta remanescente (HENDRISON, 1989). A seguir é apresentado mais detalhes sobre a exploração de impacto reduzido mostrando que é possível reduzir significativamente os danos durante as operações de exploração.

2.1 Exploração de Impacto Reduzido

A chamada Exploração de Impacto Reduzido (EIR) representa uma parte importante das práticas de bom manejo em florestas tropicais (HENDRISON, 1990). Práticas de EIR compreendem o planejamento da exploração, desenvolvimento da infraestrutura e técnicas operacionais, as quais objetivam reduzir os danos ambientais da extração de madeira enquanto aumentam a eficiência das operações (BOLTZ; HOLMES; CARTER., 2003).

A EIR foi desenvolvida com o intuito de diminuir os danos ambientais e o desperdício da exploração convencional em florestas nativas.

Segundo Cariello (2008) a exploração convencional pode ser classificada como “garimpagem florestal”. Os madeireiros tiram da floresta espécies de alto valor comercial e voltam à mesma região em intervalos cada vez mais curtos para extração dessas espécies.

A exploração florestal sem planejamento, realizada de maneira intensiva e seletiva, tem transformado as florestas de elevado estoque de madeira e valor comercial em florestas degradadas, de baixo valor comercial e difícil recuperação.

Essa falta de planejamento e de mão de obra especializada gera muitos problemas ambientais e econômicos. Os solos minerais são severamente perturbados por não existir uma análise da melhor forma de construir as trilhas de arraste, estradas de acesso e pátios de estocagem na área de exploração. A biomassa também é severamente danificada, pela derrubada das árvores sem técnicas de queda direcional, e o arraste das toras em qualquer direção, aumentando ainda mais o desperdício na colheita (HOLMES et al., 2002).

A EIR veio para diminuir os danos causados na exploração convencional. É um sistema que utiliza as melhores técnicas de extração disponíveis, que reduzem os danos às florestas residuais, o desgaste do solo e erosão, protegem a qualidade da água, atenuam os riscos de incêndios e potencialmente ajudam a manter a regeneração e proteção da diversidade biológica (UHL et al., 1997).

A EIR é considerada essencial para melhorar as operações florestais e constitui um passo substancial para o manejo sustentável da floresta. Consiste na implementação de uma série de diretrizes pré e pós-exploração criadas para proteger a regeneração avançada (mudas, varas e arvoretas), minimizar danos ao solo, prevenir danos desnecessários às espécies que não serão exploradas

(animais silvestres e produtos não madeireiros), e proteger os processos críticos dos ecossistemas (hidrologia e sequestro de carbono) (PUTZ; DYKSTRA; HEINRICH, 2000).

A EIR está fundada em princípios de planejamento, treinamento e desenvolvimento de mão-de-obra especializada e tecnologia adequada. Em relação ao planejamento, os inventários pré-exploratórios, os tratamentos silviculturais, e a análise do acesso à região a se explorar são determinantes para um bom manejo. O investimento na qualificação da mão-de-obra especializada se justifica por um bom rendimento da equipe de exploração, reduzindo os custos e desperdícios, e a diminuição de acidentes de trabalho.

Segundo Cariello (2008), a exploração de impacto reduzido possui três fases distintas para cada ciclo de corte. A fase pré-exploratória, exploratória e pós-exploratória.

2.1.1 Fase Pré-Exploratória

É realizado um ano antes da exploração, onde o licenciamento é pedido a partir da elaboração do POA e sua aprovação pelo órgão ambiental. Nessa fase se define os talhões de trabalho a serem explorados, ou seja, as unidades de trabalho (UT) ou unidades de produção anual (UPA) para exploração. A abertura das trilhas é feita para uma equipe fazer o censo da área, onde todas as informações botânicas e topográficas relevantes são sistematicamente coletadas.

No inventário 100% é feito um levantamento de todas as árvores potenciais e comerciais com o diâmetro igual ou superior ao pré-estabelecido (geralmente acima de 30 cm), as quais são identificadas, plaqueadas e mapeadas. Informações como espécie, CAP (Circunferência à Altura do Peito), DAP (Diâmetro à Altura do Peito), altura, volume, código de exploração, coordenadas geográficas são contidas no inventário florestal 100%. Estes dados são muito

importantes para realização deste trabalho, pois é através dele que saberemos a quais árvores serão exploradas, sua localização geográfica e o volume de cada árvore.

Nesta fase também é realizado o levantamento das condições de relevo e localização dos cursos d'água. Em seguida é feito o processamento e mapeamento dos dados coletados, pois os mapas são ferramentas básicas para todas as atividades e muito importantes para este trabalho, pois através dos mapas foi possível analisar as restrições geográficas e identificar os melhores locais para empilhamento de madeira (CARIELLO, 2008).

O planejamento e construção de infraestrutura permanente também são realizados nesta fase. A infraestrutura permanente é composta de pátios de estocagem, das estradas secundárias que os interligam e das estradas primárias utilizadas para o escoamento das toras até a indústria.

Com este trabalho a autora visa auxiliar no planejamento dos pátios de estocagem que são áreas abertas destinadas ao armazenamento das toras arrastadas da floresta.

A distribuição dos pátios de estocagem deve ser otimizada para facilitar o arraste e não exceder a distância ideal, evitando maior dano ao povoamento e custos desnecessários. O tamanho do estaleiro deve ser otimizado, de acordo com o potencial da área. Como regra geral o seu dimensionamento estará em 25 m X 35 m, com faixas de circulação laterais para entrada e saída do *skidder* (BRAZ et al., 1998).

Seu tamanho deve permitir o trabalho sistemático das atividades de carregamento, traçamento (se for realizado no pátio) e movimentação do trator de arraste. A disposição paralela das toras é fundamental para facilitar o carregamento e funcionamento geral do pátio de estocagem (BRAZ; OLIVEIRA, 1995).

2.1.2 Fase exploratória

Na fase de exploração somente são derrubadas às árvores sadias, com um grande DAP (Diâmetro à Altura do Peito) previamente estabelecido (geralmente DAP > 45 cm). Essas árvores são selecionadas e sinalizadas, tanto as árvores a explorar no ciclo atual, como as remanescentes do próximo ciclo. Também são sinalizadas as árvores porta-sementes, são preservadas e protegidas para garantir a continuidade da espécie (HOLMES et al., 2002).

A seleção para corte é baseada em técnicas silviculturais, considerando aspectos ecológicos e econômicos. Assim, devem ser excluídas de corte as árvores em áreas de preservação permanente (APP), protegidas por lei, e espécies raras, conforme o Código Florestal.

No arraste das toras, as árvores são preferivelmente retiradas da floresta com um *skidder* de rodas por um ramal de arraste secundário que leva até o ramal de arraste primário, e deste até o pátio. Entretanto, sempre que essa operação apresente a possibilidade de danos à floresta ou à máquina, o arraste se faz com ajuda de um cabo, por distâncias de 30 a 60 m.

Os pátios florestais são instalados para estocagem temporária das toras na floresta. As toras são traçadas de acordo com o transporte a ser usado e com o volume de madeira disponível e inventariado. As toras são empilhadas e transportadas até as serrarias.

2.1.3 Fase Pós-exploratória

A fase depois da exploração deve ser feita no mínimo um ano após a colheita. Os tratamentos silviculturais são novamente feitos; Consistem em um desbaste de liberação de copas para eliminar as árvores não comerciais que estejam competindo diretamente com as árvores marcadas para próximo corte.

Os tratamentos silviculturais podem aumentar significativamente o crescimento e valor das árvores; pesquisas mostram que esse crescimento pode ser duplicado em relação a áreas exploradas e não tratadas ou até quadruplicado em relação a uma floresta não explorada (HOLMES et al., 2002)

A avaliação tanto do impacto quanto dos desperdícios são necessárias para analisar o rendimento das operações. O impacto referente às árvores da floresta remanescente e ao tráfego das máquinas no campo. Os desperdícios são avaliados nos pátios e na floresta, calculando o rendimento e o quanto se perdeu economicamente. Esses resíduos devem ser aproveitados de alguma maneira, sendo uma alternativa para o desperdício da madeira (CARIELLO, 2008)

Novas medições das parcelas permanentes são feitas para acompanhar o crescimento e dinâmica da floresta. Mas em um intervalo maior para se obter resultados expressivos, mais ou menos cinco anos.

A infraestrutura deve ser mantida como a manutenção de pátios, estradas primárias e secundárias. A perenidade da infraestrutura construída, que voltará a ser usada para novas atividades de manejo e explorações futuras (CARIELLO, 2008).

Como foi visto práticas de Exploração de Impacto Reduzido compreendem o planejamento da exploração, desenvolvimento da infraestrutura e técnicas operacionais, as quais objetivam reduzir os danos ambientais da extração da madeira enquanto aumentam a eficiência das operações (BOLTZ; HOLMES; CARTER, 2003).

Várias ferramentas são utilizadas para auxiliar na Exploração de Impacto Reduzido, um exemplo são as geotecnologias que são utilizadas no planejamento e mapeamento da área a ser explorada. A próxima seção apresenta conceitos relacionados com geotecnologias.

2.2 Geotecnologias

Geotecnologias são tecnologias utilizadas para manipular os dados geográficos. Segundo Câmara et al. (1996) os dados geográficos ou georreferenciados são dados espaciais em que a dimensão espacial esta associada à sua localização na superfície da terra, num determinado instante ou período de tempo.

Os dados geográficos possuem três características fundamentais: espaciais, não-espaciais e temporais (DANGERMOND, 1990) (MEDEIROS; PIRES, 1994) (LAURINI; THOMPSON, 1992). As características espaciais informam a posição geográfica do fenômeno e sua geometria. As características não espaciais descrevem o fenômeno e as características temporais informam o tempo de validade dos dados geográficos e suas variações sobre o tempo.

Dados geográficos podem ser divididos em duas grandes classes de acordo com Casanova et al. (2005): estruturas vetoriais e estruturas matriciais.

As estruturas vetoriais são utilizadas para representar as coordenadas de cada entidade geográfica, através de três formas básicas: pontos, linhas e polígonos, definidas por suas coordenadas cartesianas. A Figura 1 apresenta a representação dos dados vetoriais em duas dimensões.

Um ponto é representado por um par de coordenadas espaciais (x, y) . Já uma linha é representada por um conjunto de pontos conectados enquanto um polígono é representado por uma ou mais linhas conectadas de forma que o último ponto seja idêntico com o primeiro ponto (CASANOVA et al., 2005).

Como exemplos de pontos podem-se citar sedes municipais de um estado, ou localização de aeroportos. Linhas são utilizadas para representar dados como hidrografia e rodovias. Já os polígonos são utilizados para representar unidades espaciais individuais como por exemplos divisão de bairros de um município ou mapa de vegetação de uma região.

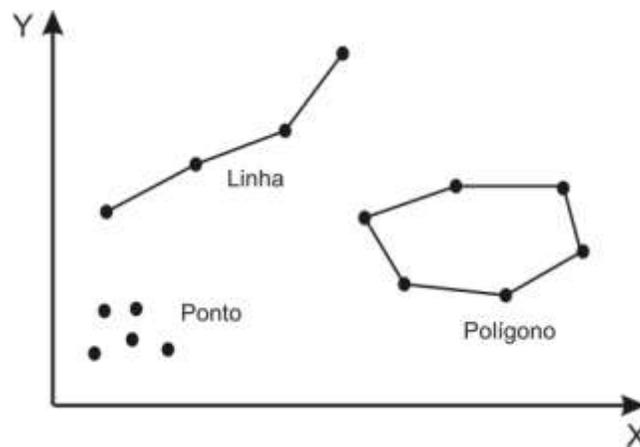


Figura 1 Representação vetorial em duas dimensões

Fonte: Adaptado de Casanova et al (2005)

A representação em formato matricial (*raster*) é caracterizada por uma matriz de células de tamanhos regulares, onde para cada célula é associado a um valor que representa sua característica geográfica. Nesta representação, o espaço é representado como uma matriz $P(m, n)$ composta de m colunas e n linhas, onde cada célula possui um número de linha, um número de coluna. (CASANOVA et al., 2005) A Figura 2 mostra a representação da estrutura matricial.

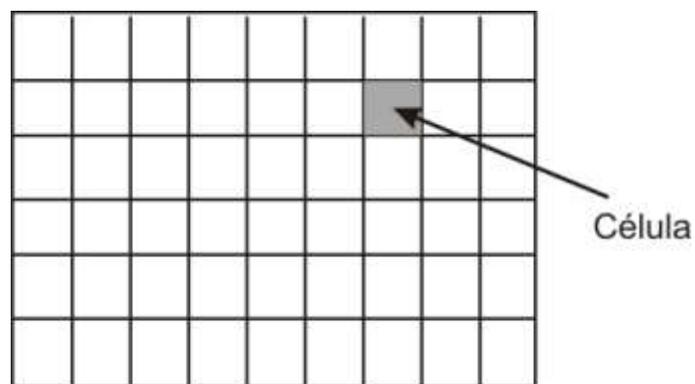


Figura 2 Representação da estrutura matricial

Fonte Adaptado de Casanova et al. (2005)

Para a manipulação dos dados geográficos é necessário utilizar geotecnologias como os Sistemas de Informações Geográficas.

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um sistema baseado em computador que permite capturar, modelar, manipular, recuperar, consultar, analisar e apresentar dados geograficamente referenciados (CÂMARA et al., 1996).

A principal diferença de um SIG para um sistema de informação convencional é sua capacidade de armazenar tanto os atributos descritivos como as geometrias dos diferentes tipos de dados geográficos. (CASANOVA et al., 2005). Assim para cada árvore em um inventário florestal, um SIG, guarda, além da informação descritiva como espécie e volume, a informação geográfica que são as coordenadas.

Segundo Câmara, Davis e Monteiro (1993) o SIG tem os seguintes componentes:

- a) Interface com o usuário;
- b) Entrada e integração dos dados;
- c) Funções de consulta e análise espacial;
- d) Visualização e plotagem;
- e) Armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de banco de dados geográficos).

Estes componentes se relacionam como mostra a Figura 3. Cada sistema implementa estes componentes de forma distinta, mas todos os subsistemas citados devem estar presentes num SIG.

Os SIGs são muito utilizados no planejamento florestal obtendo resultados satisfatórios. O que vem crescendo a cada dia para auxiliar na colheita

florestal é o uso de métodos de otimização como pesquisa operacional, principalmente em florestas plantadas.

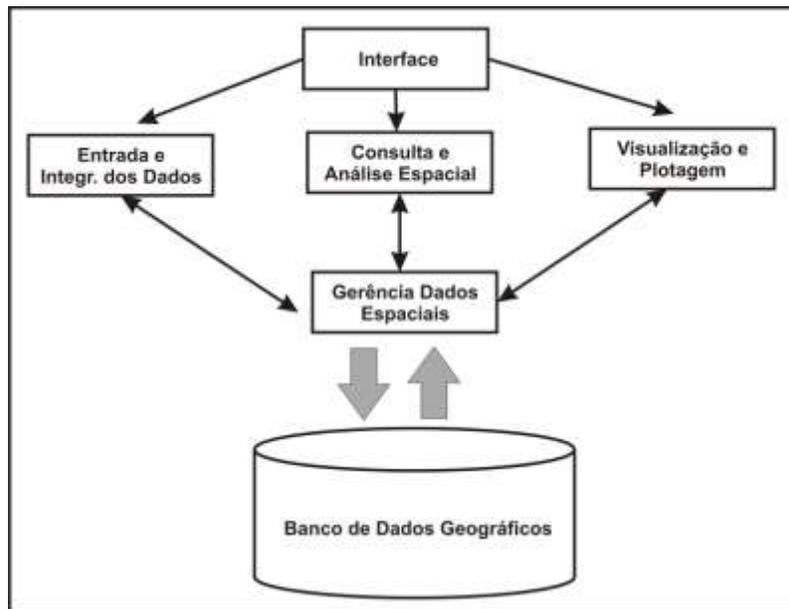


Figura 3 Estrutura geral de um SIG

Fonte: Adaptado de Câmara, Davis e Monteiro (1993)

A próxima seção apresenta conceitos relacionados aos métodos de otimização e problemas de localização que foram utilizados neste trabalho para otimização na locação de pátios de estocagem.

2.3 Métodos de Otimização

Métodos de Otimização são formas de se resolver os problemas de otimização caracterizados pela maximização ou minimização de uma ou mais funções objetivo em termos de uma ou mais variáveis de decisão num determinado domínio, geralmente, restritas a um conjunto de restrições.

Existem vários problemas clássicos que podem ser formulados como problemas de otimização, entre eles pode-se citar: os problemas de localização de instalações, o problema do caixeiro viajante, o problema de roteamento de veículos, o problema da mochila etc.

Dentre os problemas clássicos existentes, o indicado para resolver a localização dos pátios de estocagem, tema deste trabalho, foi o problema de localização de instalações.

O problema de localização de instalações procura por locais ótimos para instalação de unidades, minimizando custo ou maximizando lucro (BOWERSOX; CLOSS, 2001).

Segundo Ballou (2006) a localização de instalações é uma área comum e preferencial de pesquisas a algum tempo, sendo iniciado há mais de um século por economistas rurais e geógrafos regionais.

De acordo com Arakaki (2002) os problemas de localização podem ser modelados em grafos que é formado por nós (vértices) e arestas (arcos) e podem descrever de forma natural vias públicas, conexões de água, telefonia, etc. O termo instalação pode representar fábricas, depósitos, escolas, antenas etc.

Desta forma tais problemas são também conhecidos como problemas de localização-alocação. Os problemas de localização de instalações são considerados de difícil solução, pertencem à classe NP-difícil (*NP-hard*) (GAREY; JOHNSON, 1979). Assim, o esforço computacional para a sua solução cresce exponencialmente. Deste modo, é praticamente impossível resolver problemas reais de grande porte.

Duas classes de problemas de localização são importantes: a classe dos problemas de cobertura e a classe dos problemas de localização de medianas. Em ambas, decisões são tomadas sobre onde localizar instalações (centros), considerando os outros centros como clientes que devem ser servidos, de forma a otimizar um dado critério (ARAKAKI, 2002).

A primeira classe de problemas enfoca a distância máxima entre qualquer cliente e a instalação designada para atendimento. Tais problemas são conhecidos como problemas de cobertura e a distância máxima de atendimento é denominada distância de cobertura ou de serviço (SANTOS; SOARES; ARROYO, 2009).

A segunda classe trata da minimização das distâncias entre os clientes e as instalações (centros de atendimento). O modelo clássico utilizado para representação dos problemas desta classe é o problema das P-Medianas (PM) (SANTOS; SOARES; ARROYO, 2009).

PM é um problema de otimização combinatória (GAREY; JOHNSON, 1979). Apesar do aumento da velocidade dos processadores, o processo de solução de problemas de grande porte ainda baseia-se no aprimoramento de métodos heurísticos desenvolvidos para a resolução dos mesmos (RESENDE; RIBEIRO, 2005) (MLADENOVIC et al., 2007).

2.3.1 Descrição do Problema das P-Medianas (PM)

O problema de P-Medianas objetiva localizar p centros (medianas) em uma rede com n nós, de modo a minimizar a soma das distâncias de um ponto de demanda à mediana mais próxima.

Em um sistema de coordenadas cartesianas, a função que geralmente é usada para medir a distância entre dois pontos $P1$ (exemplo: árvore) e $P2$ (exemplo pátio) com coordenadas $(x1, y1)$ e $(x2, y2)$ respectivamente, é dada pela fórmula matemática (1):

$$d(P1, P2) = d((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

O problema PM pode ser representado através de um grafo, pois os pontos (clientes e instalações) podem ser dispostos pelas suas respectivas coordenadas.

Considere $G=(V,A)$ um grafo onde V são os vértices e A as arestas: determine um conjunto de medianas Vp com cardinalidade p , de forma que o somatório dos pesos de cada vértice das demandas $V - Vp$ até seu vértice mais próximo Vp seja minimizada. O conjunto de p instalações que formam uma solução são chamados de P-Medianas (CORRÊA, 2000).

As primeiras formulações deste problema foram apresentadas nos trabalhos de Hakimi (1964), para identificação de uma mediana, e, em seguida, generalizado para a identificação de múltiplas medianas em Hakimi (1965) e Kariv e Hakimi (1979).

2.3.2 Formulação matemática do problema PM

Neste trabalho, o PM foi modelado como um problema de programação linear inteira (0 – 1). A seguir é apresentada a formulação em programação matemática, adaptada de (CRAINIC et al., 2004).

$$\text{FO: } \text{Min} (Z) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N d_{ij} X_{ij} \quad (2)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ está atribuído a instalação } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a instalação } j \text{ esta aberta} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_j = P \quad (4)$$

$$X_{ij} - Y_j \leq 0, \quad \forall j \quad (5)$$

$$X_{ij} = \{0; 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (6)$$

$$Y_j = \{0; 1\}, \quad \forall j \quad (6)$$

Onde:

i – são os clientes;

j – são as instalações;

d_{ij} – distância entre o cliente i e a instalação j ;

P – número de instalações que serão criadas

A função objetivo (F.O) é apresentada em (2). A restrição (3) é a restrição de rota única que garante que cada cliente seja destinado a apenas uma instalação. A restrição (4) é a restrição de número de instalações que garante que o número de instalações não será maior que o valor estabelecido pelo usuário. Já a restrição (5) é a restrição de ligação o cliente a sua respectiva instalação. Por fim, a restrição (6) indica o domínio das variáveis de decisão.

2.3.3 Descrição do Problema das P-Mediana Capacitado (PMC)

No problema das PM, pode-se ter o caso em que as instalações possuem uma capacidade. De acordo com Arakaki (2002) o PMC consiste em um problema de particionamento de conjunto de n clientes (vértices), onde cada cliente possui um peso (demanda), em p agrupamentos disjuntos (instalações), de maneira que a distância total dentro de cada agrupamento seja minimizada e a restrição de capacidade de cada agrupamento seja respeitada.

As primeiras formulações do problema foram apresentadas em (HAKIMI, 1964).

2.3.4 Formulação Matemática do PMC

A seguir é apresentado o modelo de Programação Linear Inteira para o problema PMC.

$$\text{FO: } \text{Min } (Z) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N d_{ij} X_{ij} \quad (7)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ está atribuído a instalação } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a instalação } j \text{ esta aberta} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^M q_i X_{ij} \leq Q_j Y_j, \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_j = P \quad (10)$$

$$X_{ij} - Y_j \leq 0 \quad (11)$$

$$X_{ij} = \{0; 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (12)$$

$$Y_j = \{0; 1\}, \quad \forall j \quad (12)$$

Onde:

i – são os clientes;

j – são as instalações;

- d_{ij} – distância entre o cliente i e a instalação j ;
- q_i – demanda de cada cliente i
- Q_j – capacidade total de cada possível instalação j
- P – número de instalações que serão criadas

A Função objetivo é apresentada em (7). A restrição (8) é a restrição de rota única que garante que cada cliente seja destinado a apenas uma instalação. A restrição (9) impõe que a capacidade total da instalação deve ser respeitada. A restrição (10) é a restrição de número de instalações. Já a restrição (11) é a restrição de ligação do cliente a sua respectiva instalação. Por fim, a (12) é a restrição binária do modelo de programação linear inteira.

2.3.5 Resolução dos Problemas PM e PMC

Os problemas PM e PMC são considerados problemas de otimização combinatória que segundo Honer (2009) apresentam como característica principal a dificuldade de encontrar uma solução por meio de algoritmos exaustivos, devido à explosão combinatorial, o que implicaria em um tempo computacional enorme.

PM e PMC são classificados como problemas NP-difíceis (*NP-hard*) (GAREY; JONHSON, 1979) e, desta forma, o tempo para se obter a solução ótima cresce exponencialmente à medida que se aumenta os dados de entrada (número de instalações e o número de clientes). Algoritmos exatos e heurísticos já foram propostos na literatura para resolução destes problemas.

Métodos exatos propostos para solucioná-los encontram dificuldades nos casos de dimensões elevadas, uma vez que o tempo computacional necessário para a obtenção do ótimo global cresce exponencialmente à medida que aumentam os dados de entrada. Assim, métodos heurísticos e metaheurísticos

têm sido propostos para resolver o problema, encontrando boas soluções em um tempo computacional aceitável (BEZERRA, 2008).

2.3.5.1 Métodos Exatos

Os algoritmos exatos buscam encontrar a solução ótima do problema, fato que em problemas de médio e grande porte faz o algoritmo se tornar inviável devido ao tempo de processamento.

Os métodos exatos utilizam técnicas da enumeração exaustiva, busca em árvore (*Branch-and-bound* ou *treesearch*), relaxação da programação linear, métodos duais e métodos baseados em relaxação lagrangeana (GALVÃO, 1981), entre outros.

Na técnica da enumeração exaustiva, todas as soluções viáveis são avaliadas até que a solução ótima seja encontrada. Neste método a função objetivo é calculada para cada uma das possíveis configurações. Por isso este algoritmo fica inutilizável em problemas de médio e grande porte (HONER, 2009).

Järvinen, Rajala e Sinervo (1972) apresentam um trabalho com algoritmos exatos. Neste algoritmo de busca em árvore, todos os nós do grafo são inicialmente rotulados como “abertos” e um limite inferior definido é utilizado para “fechar” as instalações até que p vértices estejam abertos. O processo termina quando todas as possíveis soluções são avaliadas.

Pirkul (1987) descreve um algoritmo *Branch and Bound* que utiliza a relaxação lagrangeana nas restrições de particionamento para problemas PMC. Marsten (1972) publicou o primeiro trabalho utilizando relaxação lagrangeana para resolver os problemas das PM. Alguns outros trabalhos também aplicam a relaxação Lagrangeana para resolver PM (BARCELOS;

PIZZOLATO; LORENA, 2004) e PMC (KOSKOSIDISE; POWELL, 1992), (MULVEY; BECK, 1984).

Os primeiros trabalhos que utilizaram a relaxação da programação linear foram desenvolvidas por (REVELLE; SWAIN, 1970), (SWAIN, 1974), (GARFINKEL; NEEBE; RAO, 1974) e (GALVÃO; RAGGI, 1989).

2.3.5.2 Métodos Heurísticos e Metaheurísticos

Devido à necessidade de solução de problemas cada vez maiores, os algoritmos exatos se tornaram ineficientes devido ao problema da explosão combinatorial. Surgiram então os algoritmos heurísticos. Segundo Ballou (2006) heurísticos são quaisquer princípios ou conceitos que contribuam para reduzir o tempo médio gasto na busca de uma solução.

Embora os métodos heurísticos não garantam que uma solução ótima venha a ser encontrada, os benefícios dos tempos adequados de computação e de necessidades de memória, uma boa representação da realidade e uma qualidade satisfatória de resolução são razões para adotar a abordagem heurística para o problema de localização de instalações (BALLOU, 2006).

Maranzana (1964) foi quem propôs o primeiro algoritmo heurístico para o problema das PM, a técnica ficou conhecida como Método da Partição de Vértices. Outro método heurístico conhecido é a heurística gulosa (*greedyheuristic*) que foi proposta inicialmente por (KUEHN; HAMBURGER, 1963) e consiste em adicionar recursivamente medianas à solução. A escolha do vértice a ser incorporado na solução é feita com base no nó que produz o máximo decréscimo na função objetivo.

O algoritmo mais citado na literatura para solução do problema PM foi desenvolvido por Teitz e Bart (1968) e é conhecido como Método de Substituição de Vértices.

As metaheurísticas possuem uma estrutura com componentes genéricos que são adaptados aos diversos tipos de problemas de otimização (HERTZ; WIDMER, 2003).

Esses métodos possuem certa instalação em incorporar novas situações e exploram o espaço de soluções permitindo a escolha de soluções piores que as já encontradas, na tentativa de superar o ótimo local (HONER, 2009). Assim, uma metaheurística pode ser implementada para guiar determinada técnica a comandar o processo de busca da solução.

Segundo Honer (2009) as metaheurísticas se dividem em duas categorias: técnica de busca local e de busca populacional.

As técnicas de busca local se baseiam no conceito de vizinhança, ou seja, parte-se de uma solução inicial e exploram-se as soluções que podem ser alcançadas em um movimento. Exemplo de técnicas de busca local: Busca Tabu e *Simulated Annealing* (HONER, 2009).

As técnicas de busca populacional partem de um conjunto de soluções considerada a população inicial e sobre essa população são aplicados diversos operadores com o objetivo de melhorar os indivíduos e gerar novos integrantes. Exemplos de técnicas de busca populacional: Algoritmos Genéticos e *ScatterSearch* (HONER, 2009).

A maioria dos trabalhos aplicados aos problemas PM e PMC fazem uso de metaheurísticas como Busca Tabu (SCHILLING; ROLLAND; CURRENT, 1996), (GLOVER, 1986), (FRANÇA; SOSA; PUREZA, 1999), (SUN, 2006), Algoritmos Genéticos (HOSAGE; GOODCHILD, 1986), (DIBBLE; DENSHAM, 1993), (MANIEZZO; MINGOZZI; BALDACI, 1998), (LORENA; FURTADO, 2001), (GHOSEIRI; GHANNADPOUR, 2009), *Simulated Annealing* (GALVÃO; CHIYOSHI, 2000) e Redes Neurais (MERINO; PÉREZ; ARAGONÉS, 2003).

Jones, Mirrazavi e Tamiz (2002) afirmam que os métodos heurísticos procuram boas soluções em problemas de difícil solução, por este fato estes métodos são recomendados para problemas de otimização combinatória.

Outros autores utilizam metaheurísticas híbridas como Osman e Christofids (1994) que implementaram um algoritmo de busca tabu e o método de *Simulated Annealing* para PMC. Resende e Wernewck (2004) combinam elementos de diversas metaheurísticas como o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), Busca Tabu e Algoritmos Genéticos para resolver problemas PM. Outros trabalhos como (KAVEH; ZADEH; SAHRAEIAN, 2010) e (DÍAZ; FERNÁNDEZ, 2006) também utilizam metaheurísticas híbridas.

Para este trabalho foram analisadas várias heurísticas e metaheurísticas diferentes. O método escolhido foi a metaheurística híbrida (HYBRID) apresentada em (RESENDE; WERNECK, 2004). Esta metaheurística foi escolhida por apresentar excelentes resultados para problemas PM comparados com outras metaheurísticas. Em todos os casos apresentados em Resende e Werneck (2004) a solução obtida por este método foi 0,1% melhor que outros métodos.

Outro fator que influenciou na escolha foi a disponibilidade do código desenvolvido em C++ gratuitamente para uso em pesquisas, assim foi possível fazer as modificações no código para que a metaheurística fosse utilizada para problemas PMC também.

HYBRID é um método que combina elementos de diversas metaheurísticas como o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), Busca Tabu e Algoritmos Genéticos. É uma metaheurística para resolver o problema de p-mediana não capacitado e foi modificada neste trabalho para resolver os problemas p-mediana capacitado.

O pseudocódigo adaptado da metaheurística HYBRID desenvolvida por (RESENDE; WERNECK, 2004) é apresentado a seguir. De forma resumida é um método iterativo onde cada iteração aplica um algoritmo guloso randômico seguido por um processo de busca local e armazena as melhores soluções de cada iteração por meio de um processo chamado religamento de caminhos (*path relinking*). Depois que todas as iterações foram feitas, o algoritmo tem uma segunda fase chamada de pós-otimização que combina as diversas soluções ótimas encontradas (nas iterações) para obter a melhor entre elas, que será a solução final.

```

Function HYBRID (semente, num_iter, tamanho_elite)
1   Gera Solucao Aleatoria (semente);
2   IniciaElite (elite, tamanho_elite);
3   for i=1 to num_iter do
4       S ← Construção Aleatoria ( );
5       S ← Busca Local (S);
6       S' ← Seleciona (elite, S);
7       if (S ≠ NULL) then
8           S' ← Religamento Caminhos(S, S');
9           Adiciona (elite, S');
10      endif
11      Adiciona(elite, S);
12  endfor
13  S ← Pós Otimização(elite);
14  return S;
end HYBRID

```

Os valores passados como parâmetro na função HYBRID são considerados parâmetros de inicialização da metaheurística. O parâmetro *semente* é o valor utilizado para gerar valores aleatórios, seu valor inicial é 1. Este valor vai sendo modificado no decorrer da execução. O parâmetro *num_iter* é o número de iterações que a metaheurística irá executar. O valor usado neste trabalho foi 32, conforme sofrido por (RESENDE; WERNECK, 2004). O parâmetro *tamanho_elite* define o tamanho do conjunto de soluções

elite que armazena as melhores soluções. O valor usado neste trabalho foi 10 conforme sugerido por (RESENDE; WERNECK, 2004).

O procedimento *Gerar Solução Aleatoria* apresentado na linha 1 do pseudocódigo recebe como parâmetro a variável *semente* e cria uma solução aleatória inicial.

O procedimento *Inicia Elite* apresentado na linha 2 recebe como parâmetro o *tamanhoElite* e inicia o conjunto de soluções elite com soluções aleatórias.

O número de iterações da metaheurística é controlado através do laço (*loop*) apresentado na linha 3 do pseudocódigo.

O procedimento *Construção Aleatória* cria uma solução através de um algoritmo construtivo. Este algoritmo foi baseado no método de construção da heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* – Procedimentos de Busca Gulosos, Aleatórios e Adaptativos) que é similar ao algoritmo guloso, ou seja, adiciona valores na solução no decorrer do tempo, escolhendo a mais vantajosa em cada iteração. Neste procedimento não foi utilizada a estratégia aleatória normalmente utilizada em GRASP. Foi utilizado um método desenvolvido pelos próprios autores (RESENDE; WERNECK, 2004) chamado *guloso simples (sample)*, similar ao algoritmo guloso, mas ao invés de selecionar a melhor entre todas as soluções possíveis, ele considera somente $q < m$ inserções possíveis (escolha uniformemente aleatória) em cada iteração. Onde q é um valor aleatório e para criar este valor utiliza-se a fórmula (13).

$$q = \left\lceil \log_2 \left(\frac{m}{p} \right) \right\rceil \quad (13)$$

Onde:

m : número de possíveis instalações;

p : número de instalações que serão criadas.

O procedimento de *Busca Local* apresentado na linha 5, recebe a solução gerada pela *Construção Aleatória* e procura uma solução melhor na vizinhança da solução atual. Se a solução existir, automaticamente se torna a solução atual e a busca local recursivamente será aplicada nesta solução. O procedimento termina quando nenhuma solução melhor que a atual for encontrada em sua vizinhança. Segundo (MATEUS; SILVA; RESENDE, 2011) a busca local pode ser vista como partindo de um vértice $s \in S$ e examinando os nós adjacentes no grafo X em busca de uma solução melhor. Na variação *first improving*, a busca local se move para a primeira melhor solução encontrada na vizinhança, enquanto a variação *best improving* todas as soluções da vizinhança são avaliadas de modo que a busca local se direcione para a melhor solução encontrada.

No procedimento de *Busca Local* apresentado foi utilizado uma alternativa de implementação usando a variação *best improvement* proposta por (RESENDE; WERNECK, 2004).

Em cada iteração do algoritmo, uma solução é selecionada no conjunto de soluções elite e combinada com a melhor solução encontrada recentemente S . Esta seleção é realizada no procedimento *Seleciona* apresentado na linha 6 do pseudocódigo.

O procedimento *Religamento Caminhos* é chamado para combinar o par de soluções S (resultado da busca local) e S' (resultado da seleção no conjunto de soluções elite) e é apresentado na linha 8. O algoritmo começa com a solução S e gradativamente se transforma em S' . As operações que transformam as soluções em cada passo são os mesmos utilizados na busca local: inserções,

remoções e trocas com duas diferenças principais: (1) o número de movimentos permitidos é restrito, somente elementos $S \setminus S'$ podem ser inseridos e somente aqueles em $S \setminus S$ podem ser removidos; (2) Movimentações que não melhoram são permitidas.

O procedimento *Adiciona* apresentado na linha 9 deve decidir se a nova solução deve ser inserida no conjunto de soluções elite ou não. O critério utilizado é baseado na noção de diferença simétrica entre a solução a ser inserida e as soluções existentes no conjunto elite. Chama-se diferença simétrica dos conjuntos A e B ao conjunto de todos os elementos que pertencem a um e somente um dos conjuntos A e B . Se o conjunto está cheio, a nova solução deve também ter o custo menor que o custo da pior solução contida no conjunto elite.

O procedimento *Adiciona* é chamado novamente na linha 11 para a solução S .

Ao final da execução das iterações é chamado o procedimento *Pós Otimização* apresentado na linha 13 do pseudocódigo da metaheurística. Este procedimento é a fase onde as soluções elite são combinadas entre si para encontrar a melhor solução. A combinação entre as soluções contidas no conjunto elite é realizada através do religamento de caminhos explicado anteriormente. A melhor solução após a comparação é retornada pela metaheurística.

3 METODOLOGIA GERAL

3.1 Área de Estudo

Foram utilizadas duas áreas diferentes neste trabalho. A primeira área esta localizada na Fazenda Pica-Pau no município de Almeirim, região norte do estado do Pará como mostra a Figura 4.

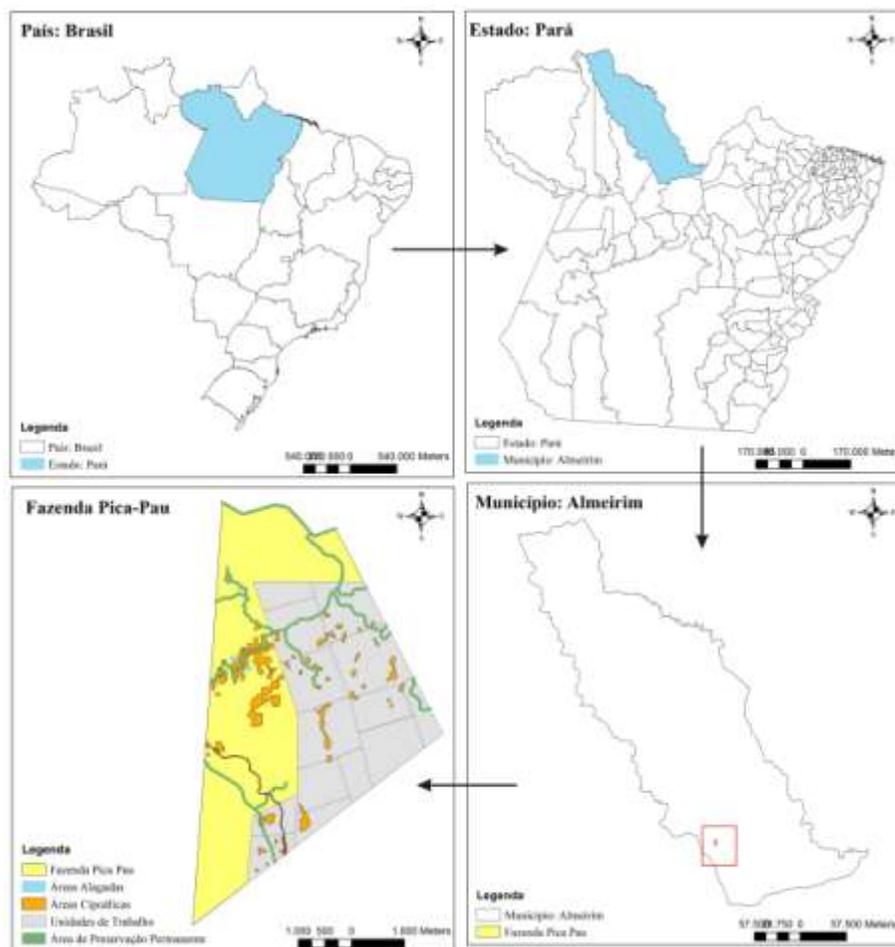


Figura 4 Localização da primeira área de estudo no estado do Pará

Segundo Caldeira (2006) esta região compreende a zona climática A (tropical chuvosa). A precipitação anual em geral é superior a 1600 mm/ano. Durante o ano existem dois períodos bem definidos um com chuvas fortes de janeiro a maio e outro com estação mais quente e menos chuvosa, indo de junho a dezembro. A umidade relativa é sempre alta, em média 80%. As temperaturas apresentam médias mensais entre 24°C e 26°C.

Os ambientes fitoecológicos que poderão ser identificados na região são: Floresta Ombrófila densa, Floresta Ombrófila dos Platôs e Floresta Ombrófila Sub-montana (CALDEIRA, 2006).

A Figura 5 apresenta o mapa da Fazenda Pica-Pau mais detalhado com informações sobre a divisão das unidades de trabalho (UTs), localização das Áreas de Preservação Permanente, Áreas Cipoólicas e Áreas Alagadas.

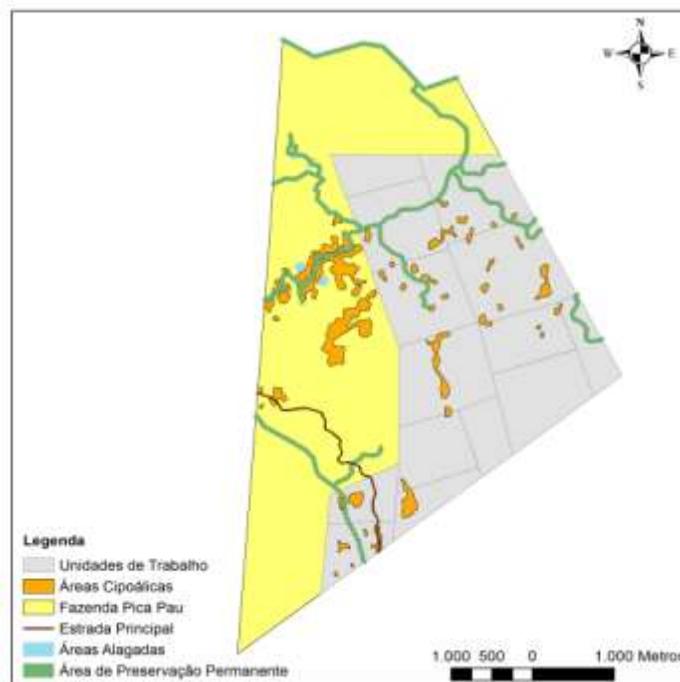


Figura 5 Detalhes da Fazenda Pica-Pau localizada no estado do Pará

A Figura 6 apresenta a divisão numerada das unidades de trabalho adotadas neste estudo.

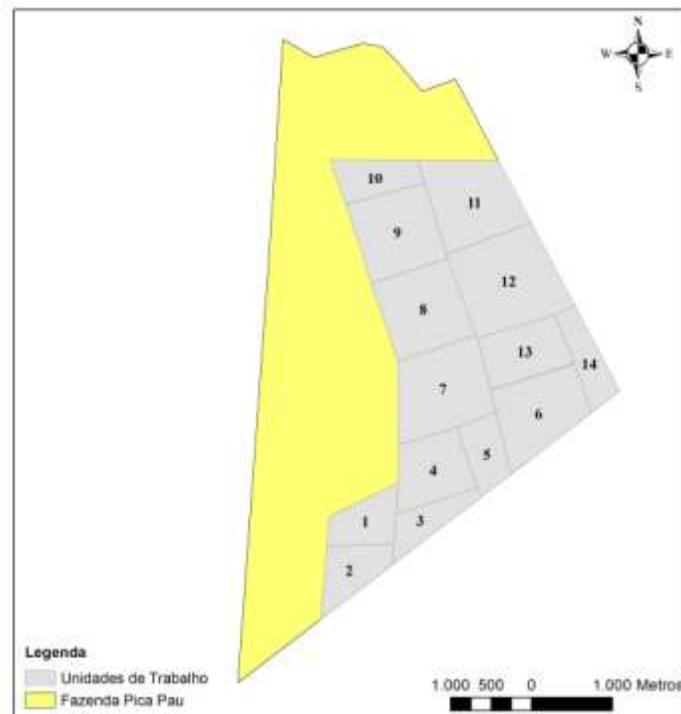


Figura 6 Divisão das unidades de trabalho na Fazenda Pica-Pau localizada no estado do Pará

Os dados desta área foram disponibilizados pela Juruá Florestal *Ltda*. Os dados iniciais foram disponibilizados em formato vetorial compatível com o sistema de informações geográficas utilizado. Este conjunto refere-se á área e perímetro das unidades de trabalho e da fazenda Pica-Pau, estrada principal existente na área, áreas de igarapés (áreas alagadas), áreas cipoólicas, áreas de preservação permanente, curvas de nível e o inventário florestal realizado na área com informações detalhadas de todas as árvores da região.

A Figura 7 mostra a localização das árvores de acordo com o Inventário 100% realizado na área. Ao todo foram inventariadas 7.832 árvores, dentre elas, 63% são para exploração, 10% são matrizes, 21% são remanescentes e 5% são árvores sem comercialização (5%).

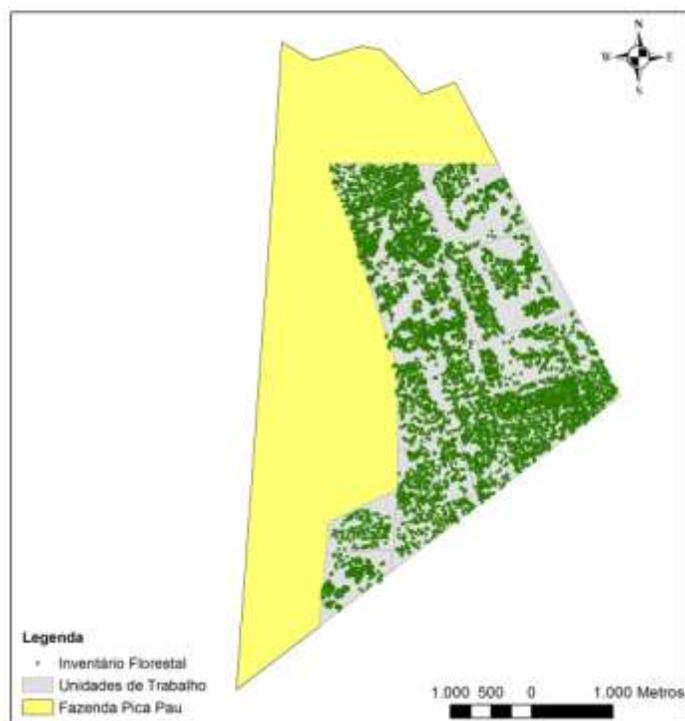


Figura 7 Localização das árvores de acordo com o Inventário Florestal da Fazenda Pica-Pau localizada no estado do Pará

A segunda área de estudo está localizada no município de Bujari, região nordeste do estado do Acre como mostra a Figura 8.

Nesta região o clima é do tipo equatorial quente e úmido, caracterizado por altas temperaturas, elevados índices de precipitação pluviométrica e alta umidade relativa do ar. A temperatura média anual está em torno de 24,5 °C,

enquanto a máxima fica em torno de 32°C (PEREIRA, ARAÚJO; BARDALES, 2010).

O tipo de solo da região é Argissolo e o tipo de vegetação predominante é a Floresta Aberta com bambu e a Floresta Densa (PEREIRA, ARAÚJO; BARDALES, 2010).

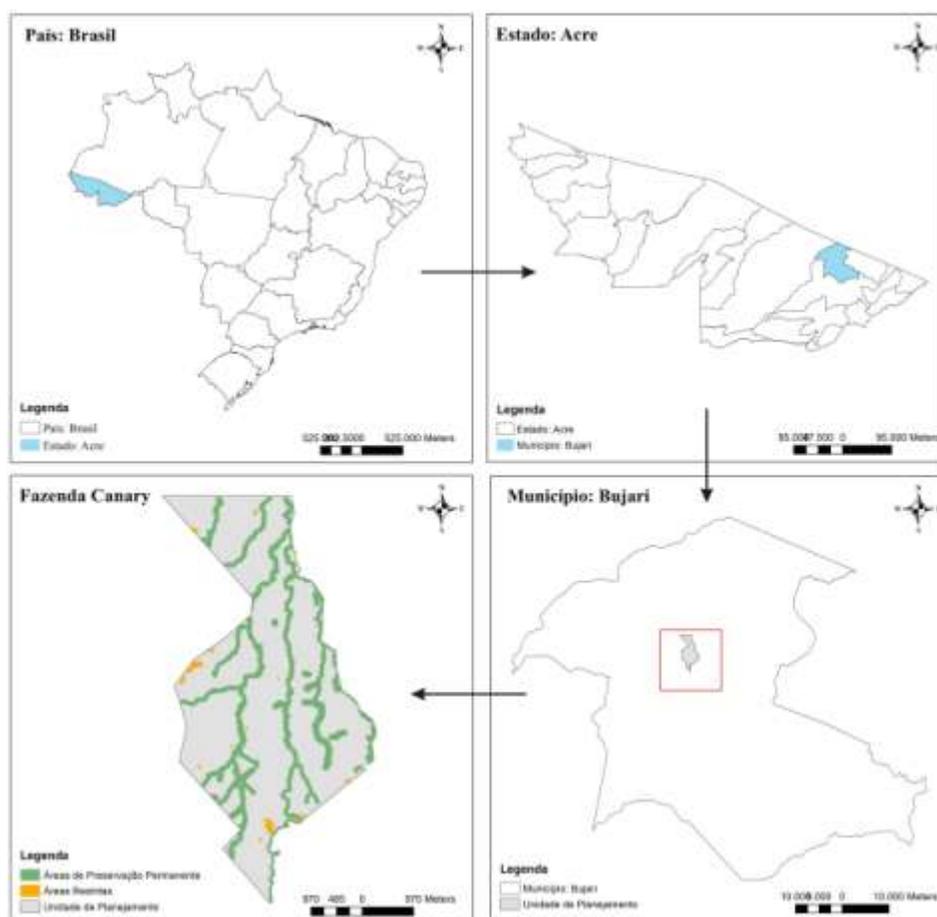


Figura 8 Localização da área de estudo no estado do Acre

A Figura 9 apresenta um mapa mais detalhado da unidade de produção anual da segunda área estudada neste trabalho. É uma área com

aproximadamente 1560 hectares denominada UPA05 no Plano de Manejo Florestal da Fazenda Canary.

O mapa da Figura 9 mostra a localização das áreas de preservação permanentes (APP) e das áreas restritas que são zonas restritivas para alocação de pátios e estradas cuja declividade é superior a 12%. Possui também a localização de estradas secundárias e o perímetro da unidade de produção anual (UPA).

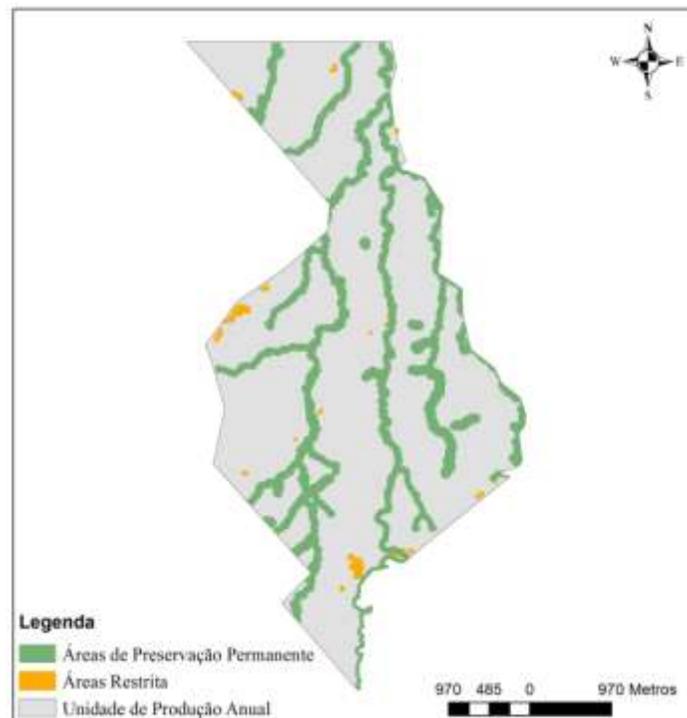


Figura 9 Mapa detalhado da área de estudo localizada na Fazenda Canary no estado do Acre

A Figura 10 apresenta o mapa com a localização das árvores inventariadas na unidade de produção anual 05 da Fazenda Canary no município de Bujari no estado do Acre.

O inventário florestal 100% desta área apresentou um total de 23.650 árvores. Dentre estas, 28% são exploráveis, 14% são porta sementes, 31% são para corte futuro, 8% são proibidas de corte/raras, 1% são árvores imunes/segundo ciclo e 18% são árvores em área de preservação permanente (APP). Neste estudo iremos trabalhar apenas com as árvores exploráveis.

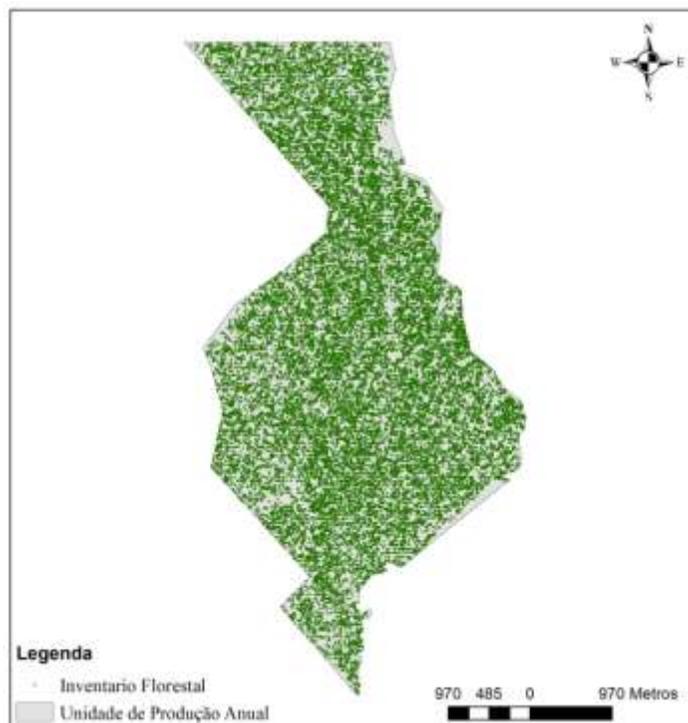


Figura 10 Localização das árvores inventariadas na área de estudo da Fazenda Canary localizada no estado do Acre

Esta unidade de produção anual, no plano de manejo utilizado na Fazenda Canary, não foi dividida em unidades de trabalho como a área mostrada anteriormente.

Esta unidade de produção anual foi dividida em 16 unidades de trabalho. Essa divisão foi realizada de acordo com as Áreas de Preservação Permanente para evitar que as árvores sejam arrastadas via APP. A divisão final é mostrada na Figura 11.



Figura 11 Divisão da área da Fazenda Canary localizada no estado do Acre em 16 unidades de trabalho

3.2 Métodos

O processamento dos dados foi realizado em duas etapas: análise geográfica e otimização.

A análise geográfica foi utilizada para identificar os melhores locais para criação dos pátios de estocagem (locais planos, fora de APP e de áreas restritas e locais sem árvores remanescentes) e a otimização foi utilizada para localizar dentre os locais identificados pela análise geográfica os locais ótimos para instalação dos pátios levando em consideração a distância entre árvore-pátio.

3.2.1 Análise Geográfica

A análise geográfica foi desenvolvida no Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGIS e foi realizada da mesma forma para os dois artigos. Seguiram-se as seguintes restrições geográficas:

- a) Inclinação do terreno (obtida a partir das curvas de nível) – os pátios devem ser criados em lugares planos. A restrição utilizada foi que os pátios não podem ser criados em áreas com inclinação acima de 15%. Dependendo da situação este valor pode ser modificado;
- b) Área de Preservação Permanente (APP): Os pátios não devem ser criados dentro de APP;
- c) Áreas Cipoálicas: Os pátios não devem ser criados dentro de áreas de cipós;
- d) Áreas Restritas: Os pátios não devem ser criados em áreas restritas. Estas áreas restritas foram definidas anteriormente na área localizada no estado do Acre;

- e) Árvores Remanescentes/Raras: Árvores remanescentes ou raras não podem ser derrubadas para criação de pátios;

Outras restrições geográficas podem ser criadas de acordo com os dados disponíveis da área, como tipo de solo, a geolocalização das árvores de maior volume a serem exploradas, estradas pré-existentes na propriedade, entre outras restrições. Quanto maior o detalhamento da área, mais completo será o resultado das restrições geográficas.

As restrições geográficas foram realizadas através de vários passos:

(1) União das UTs (área Pará) e das Repartições (área Acre) com a camada APP para identificar as áreas dentro e fora da APP. A camada resultante foi convertida em *raster* e reclassificada de acordo com a Tabela 1. O mesmo foi feito para a camada de Áreas Cipoólicas (na área Pará) e Áreas Restritas (na área Acre). Esse passo pode ser feito com qualquer outra característica da área.

Tabela 1 Classificação utilizada nas camadas APP, Áreas Cipoólicas e Áreas restritas

Valor	Classificação	Descrição	Cor
1	Muito Baixa	Áreas fora da APP, Áreas sem cipós e Áreas não restritas	Azul
5	Área Restrita	Áreas dentro da APP, Áreas cipoólicas e Áreas Restritas	Vermelho

A Figura 12 apresenta o resultado do passo (1) para a camada de Área de Preservação Permanente (a) e para a camada de Áreas Cipoólicas (b) da unidade de trabalho 14 na área localizada no estado do Pará.

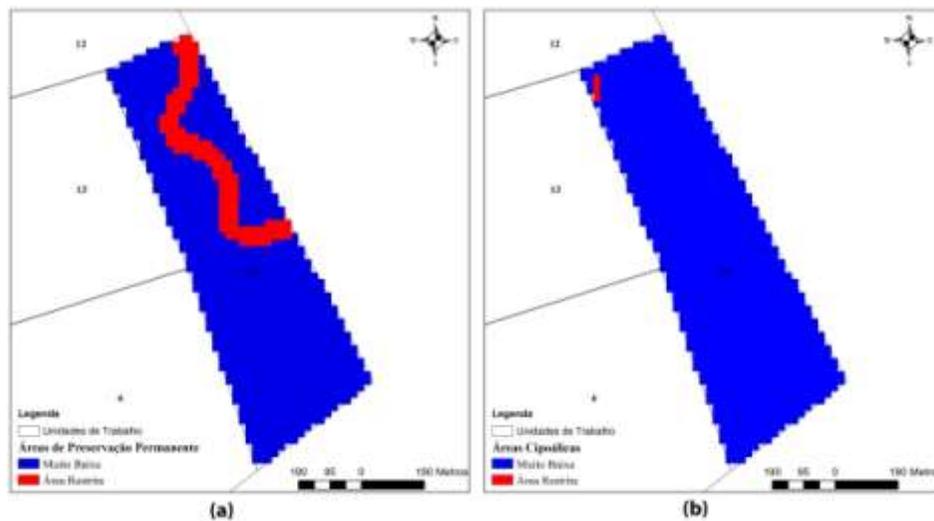


Figura 12 Resultado do passo (1) para UT 14 da área localizada no estado do Pará. (a) Camada de Área de Preservação Permanente e (b) Camada de Áreas Cipoólicas

A Figura 13 (a) apresenta o resultado do passo (1) para a camada de área de Preservação Permanente e a Figura 13 (b) apresenta o resultado do passo (1) para a camada de áreas restritas, ambas as camadas da unidade de trabalho 3 na área localizada no estado do Acre.

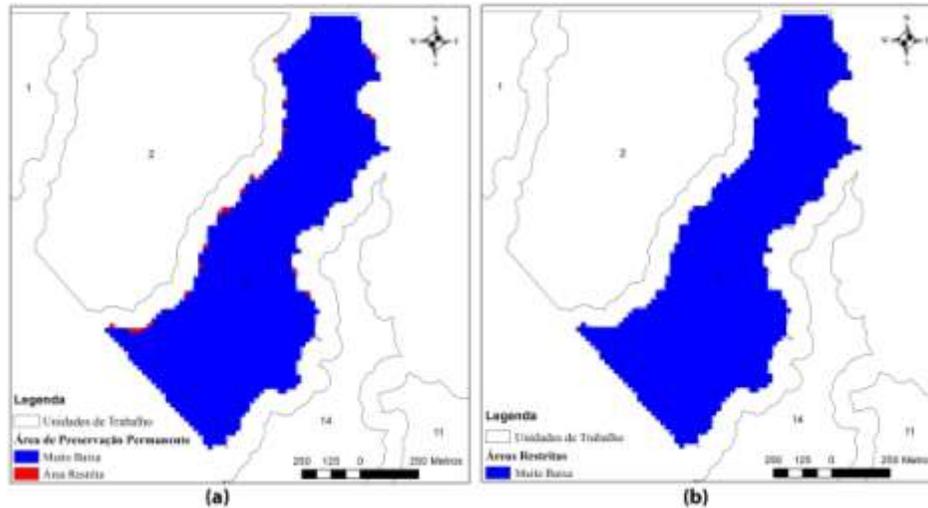


Figura 13 Resultado do passo (1) para unidade de trabalho 3 da área localizada no Acre. (a) Camada de Área de Preservação Permanente e (b) Camada de Áreas Restritas

(2) Foram selecionadas todas as árvores remanescentes/raras no inventário florestal das áreas estudadas e gerada uma nova camada chamada “Árvores Remanescentes”. Para cada árvore desta camada foi gerado um *buffer* de 20 metros. Como a localização dos pátios foram pontos que correspondem ao centro de cada pátio e como o tamanho do pátio utilizado neste trabalho foi de 20 X 25 metros, o valor de 20 metros para o tamanho *buffer* garante que a árvore não precisará ser retirada para a construção do pátio.

O resultado do *buffer* foi convertido em *raster* e reclassificado seguindo a mesma classificação da Tabela 1. Área dentro dos *buffers* área foi considerada restrita para construção de pátios de estocagem de madeira.

A Figura 14 apresenta o resultado do passo (2) para a unidade de trabalho 14 da área localizada no estado do Pará.

A Figura 15 apresenta o resultado do passo (2) para a unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre.

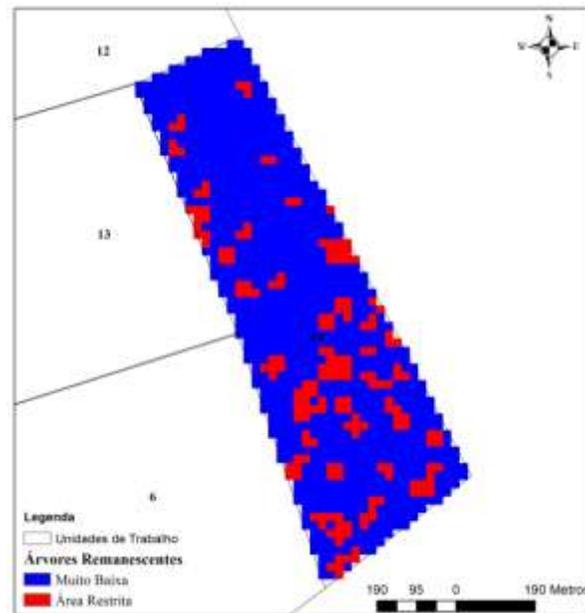


Figura 14 Resultado do passo (2) para unidade de trabalho 14 da área Pará

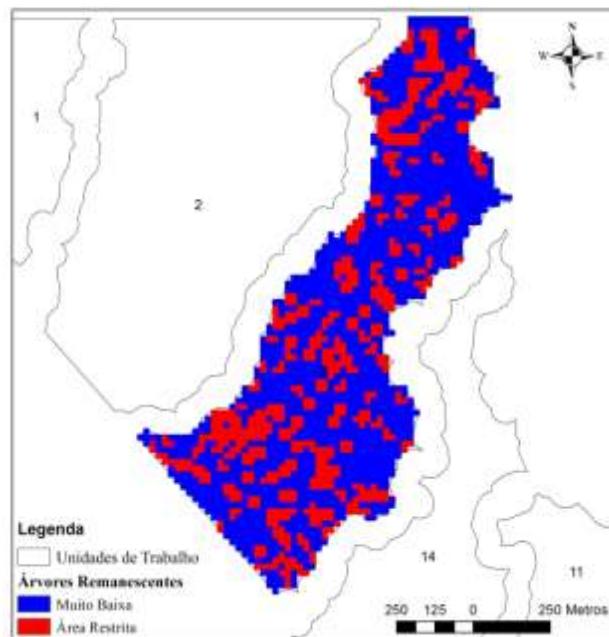


Figura 15 Resultado do passo (2) para unidade de trabalho 3 da área Acre

(3) O modelo de elevação foi gerado a partir das curvas de nível de cada região e a camada de inclinação foi criada a partir do modelo de elevação. A camada de inclinação foi reclassificada de acordo com os dados da Tabela 2.

Tabela 2 Classificação utilizada na camada de inclinação

Valor	Restrição	Classificação	Cor
1	$\leq 3,0\%$	Muito Baixa	Azul
3	$> 3\%$ e $\leq 15\%$	Média	Verde
5	$> 15\%$	Área Restrita	Vermelho

A Figura 16 apresenta o resultado do passo (3) para a unidade de trabalho 14 da área localizada no estado do Pará.

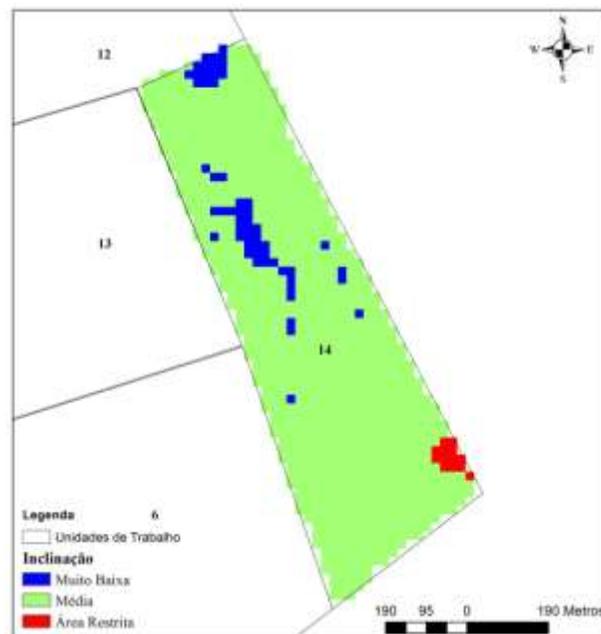


Figura 16 Resultado do passo (3) para a área localizada no estado do Pará

A Figura 17 apresenta o resultado do passo (3) para a unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre.

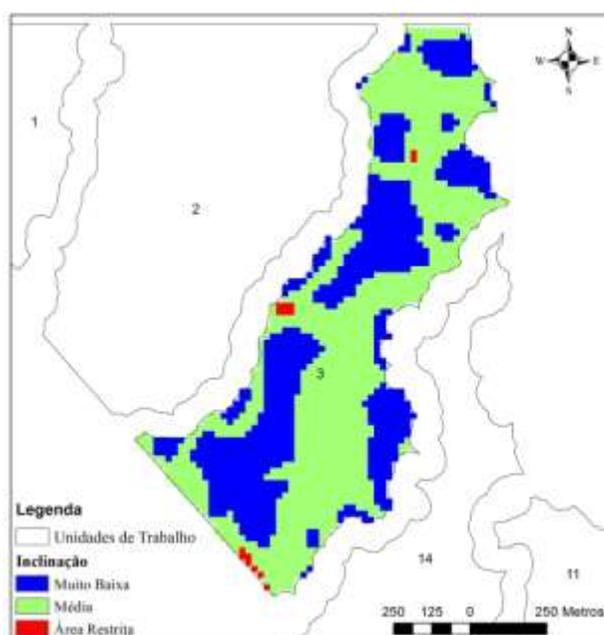


Figura 17 Resultado do passo (3) para a área Acre

(4) O método de sobreposição ponderada foi utilizado nas camadas criadas no passo (1), (2) e (3) para obter como resultado uma camada com os melhores locais para instalação de pátios de estocagem de acordo com as restrições geográficas utilizadas.

A proporção dos pesos utilizada para as camadas mostradas anteriormente foi: APP 20%, Áreas Cipoálicas/Áreas Restritas 20%, Árvores Remanescentes 30% e Inclinação 30%. Estes pesos foram escolhido de maneira empírica sem nenhum embasamento científico e as camadas de árvores remanescentes e inclinação tiveram um peso maior porque são fatores importantes a serem considerados no planejamento dos pátios de estocagem,

pois não é possível construir pátios em áreas com inclinação elevada e não é aconselhável derrubar árvores remanescentes para criação de pátios.

Estes pesos podem ser modificados de acordo com a situação da área e de acordo com as camadas que estão sendo utilizadas.

(5) O próximo passo foi a reclassificação do resultado gerado na sobreposição ponderada do item (4) de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 Tabela de reclassificação do resultado da análise geográfica

Valor	Valor Reclassificado	Classificação	Cor
1 – 2	1	Áreas possíveis para empilhamento de madeira	Verde
3 – 5	5	Áreas restritas para empilhamento de madeira	Cinza

A sobreposição ponderada retorna um *raster* e cada célula deste *raster* resultante possui um valor que varia de 1 a 5. A reclassificação é necessária para definir os locais que é e não é possível o empilhamento de madeira, ou seja, decisão binária. Na reclassificação as células que possuem valores 1 ou 2 vão passar a ter valores 1 (áreas possíveis para o empilhamento de madeira) e as células que possuem valores 3, 4 ou 5 vão passar a ter o valor 5 (áreas restritas para o empilhamento de madeira). Estes valores são de acordo com a Tabela 3 apresentada anteriormente.

A camada reclassificada (ou seja, *raster* com células de valores 1 ou 5) apresenta as áreas onde é possível o empilhamento de madeira e as áreas restritas para o empilhamento de madeira. A próxima etapa foi transformar a camada resultante *raster* em uma camada vetorial para ser usada no passo (7).

A Figura 18 apresenta o mapa resultante do passo (5) para a unidade de trabalho 14 da área localizada no estado do Pará e a Figura 19 apresenta o mapa

resultante do passo (5) para unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre.



Figura 18 Resultado do passo (5) para a unidade de trabalho 14 da área Pará

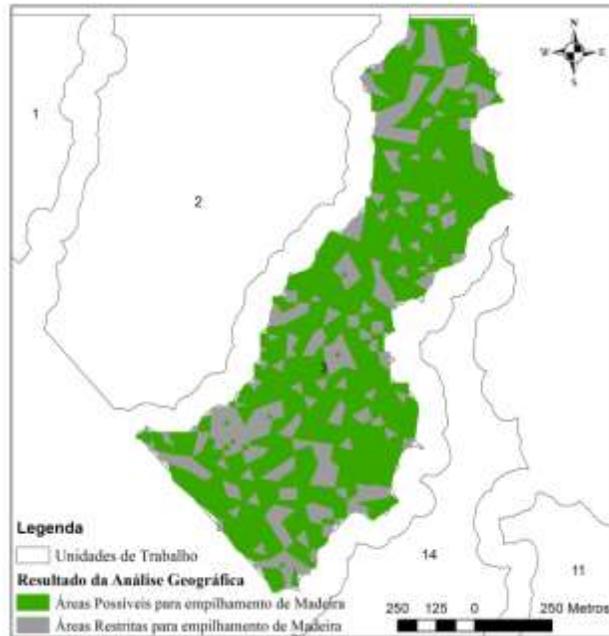


Figura 19 Resultado do passo (5) para a unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre

(6) Como a entrada para os métodos de otimização utilizados neste trabalho são pontuais foi necessário criar uma nova camada chamada Possíveis Pátios. Nesta camada foram gerados pontos com uma distância de 50 metros entre si. Este valor foi escolhido pelo fato do tamanho do pátio usado neste trabalho ser de 20 X 25 (ou 25 X 20) metros e porque os pontos representam o centro do pátio.

A Figura 20 (a) mostra um exemplo de como foi gerada a camada de possíveis pátios para a unidade de trabalho 14 localizada na área do estado do Pará e a Figura 20 (b) apresenta como funciona a numeração destes pátios. Esta numeração foi utilizada para localizar os pátios escolhidos pelos métodos de otimização.

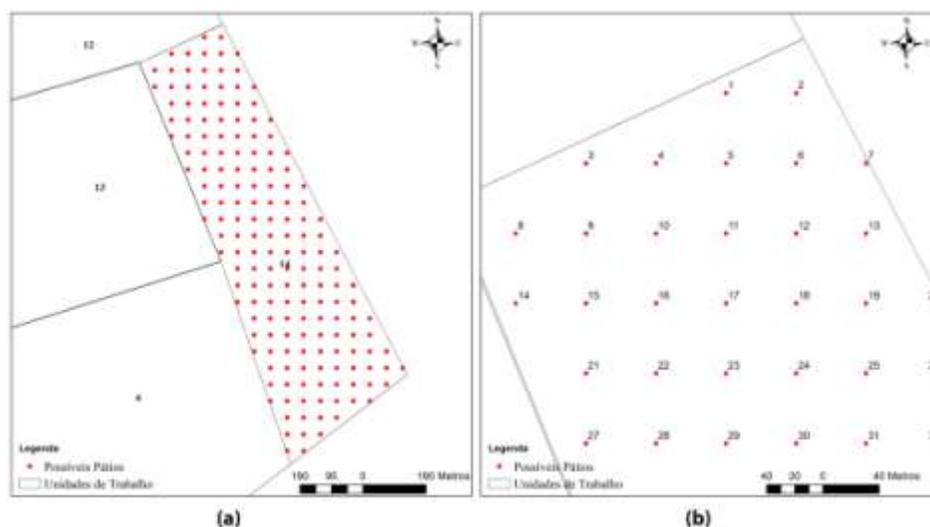


Figura 20 Exemplo de como foi gerada a camada de possíveis pátios (a) e a numeração dos pátios (b) para a unidade de trabalho 14 da área Pará

(7) O próximo passo foi selecionar os pontos dos possíveis pátios dentro da área possível para empilhamento de madeira para cada unidade de trabalho na área localizada no estado do Pará e para cada unidade de trabalho da área localizada no estado do Acre. Os pontos resultantes foram usados nos arquivos de entrada dos métodos de otimização.

(8) Outros pontos que também foram utilizados nos arquivos de entrada dos métodos de otimização foram os pontos referentes a localização das árvores para exploração. Para isso foi realizado um filtro na camada do inventário 100% de cada área estudada para selecionar apenas as árvores a serem exploradas. A partir da seleção foi gerada uma nova camada chamada “Árvores para exploração” para cada unidade de trabalho da área localizada no estado do Pará e para cada unidade de trabalho da área localizada no estado do Acre.

3.2.2 Métodos de Otimização

Cada artigo utilizou diferentes métodos de otimização, por isso a metodologia referente aos métodos de otimização será apresentada nos respectivos artigos.

4 CONCLUSÃO

O trabalho apresenta duas metodologias que combinam sistemas de informações geográficas e métodos de otimização para auxiliarem no planejamento dos melhores locais para criação de pátios de estocagem em uma área de floresta natural.

No primeiro artigo é apresentada uma metodologia que integra geotecnologias com métodos de otimização para criação de pátios de estocagem para auxiliar na exploração de baixo impacto. Entre os métodos de otimização comparados, a metaheurística apresentou resultados muito parecidos, em alguns casos, iguais ao resultado ótimo da programação linear inteira, com a vantagem de um tempo bem menor de processamento. Isso mostra que é mais vantagem utilizar a metaheurística, principalmente quando o número de variáveis do modelo for muito alta.

No segundo artigo é apresentado um modelo matemático que minimiza o custo de construção de pátios de estocagem e minimiza a distância de arraste árvore-pátio de acordo com restrições de volume máximo que cada pátio comporta e distância máxima de arraste aceita entre árvore pátio. Os resultados encontrados foram satisfatórios e mostrou que este modelo é útil para auxiliar na tomada de decisão durante o planejamento das locações de pátios de estocagem. Deve ser usado em combinação com a abordagem empírica e intuitiva com é feito atualmente para agilizar e melhorar os resultados, lembrando que não apenas os custos devem ser considerados, mas o impacto ambiental também.

Este estudo também mostrou que a interdisciplinaridade é um excelente caminho para as realizações de estudos e pesquisas, pois interagem diversas formas de se pensar em melhorias para problemas difíceis de serem tratados. Neste caso foi utilizado o Sistema de Informação Geográfica adicionada a

Métodos de Otimização como Programação Linear Inteira e Metaheurísticas, visando resolver problemas de planejamento florestal.

REFERÊNCIAS

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

ARCE, J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando à minimização de custos**. 1997. 98p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 616 p.

BARCELOS, F. B.; PIZZOLATO, N. D.; LORENA, L. A. N. Localização de escolas do ensino fundamental com modelos capacitados e não-capacitados: Caso de Vitória/ES. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 133-149, jan./abr. 2004.

BARRETO, P. et al. Costs and benefits of forest management for timber production in eastern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.108, p. 9-26, 1998.

BARROS, A. C.; VERÍSSIMO, A. **A expansão madeireira na Amazônia: impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará**. 2. ed. Belém: IMAZON, 2002. 166 p.

BERGER, R. et al. Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da programação linear. **Revista Floresta**, [S.l.], v.33, n.1, p.53-62, 2003.

BEZERRA, S. N. **Algoritmos evolutivos paralelos aplicados ao problema das P-medianas**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, 2008.

BOLTZ, F.; HOLMES P. T.; CARTER, D. R. Economic and environmental impacts of conventional and reduced-impact logging in Tropical South America: a comparative review. **Forest Policy and Economics**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 69-71, 2003.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística empresarial: processo de integração da cadeia de suprimento**. São Paulo: Atlas, 2001. 602 p.

BRAZ, E. M.; CARNIERI, C.; ARCE, J. E. Um modelo otimizador para organização dos compartimentos de exploração em floresta tropical. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n.1, p.77-83, 2004.

BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. Arraste em floresta tropical: análise para identificação dos parâmetros ideais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 2., 1995. Salvador. **Anais...** Viçosa, MG: SIF, 1995. p. 222-237.

BRAZ, E. M. et al. Manejo florestal de precisão: modelo digital de exploração e manejo de Florestas Naturais. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E.M.; OLIVEIRA, M. V. N. (Ed.). **Manejo de precisão em Florestas Tropicais: modelo digital de exploração florestal**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2007. p. 29-30.

BRAZ, E. M. et al. **Plano de exploração sob critérios de manejo florestal de baixo impacto**. Rio Branco: Embrapa-Acre, 1998. (Circular Técnica, n. 27).

CALDEIRA, N. A. M. **Plano de manejo florestal sustentado Juruá –I**: Out. 2006. Relatório da empresa Juruá Florestal LTDA.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

CÂMARA, G. et al. **Anatomia de sistemas de informação geográfica**. Campinas: X Escola de Computação, Instituto de Computação, UNICAMP, 1996.

CARIELLO, R. V. **Considerações sobre a exploração florestal de impacto reduzido**. Seropédica, 2008. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação) - Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

CASANOVA M. A. et al. **Banco de dados geográficos**. Curitiba: MundoGeo, 2005.

CONTRERAS, M.; CHUNG, W. A computer approach to finding an optimal log landing location and analyzing influencing factors for ground-based timber harvesting. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 37, n. 2, p. 276-292, Feb. 2007.

CORREA, E. S. **Algoritmos genéticos e busca tabu aplicados ao problema das p-medianas**. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

CRAINIC, T. G. et al. Cooperative parallel variable neighborhood search for the p-median. **Journal of Heuristics**, Boston, v. 10, p. 293-314, 2004.

DANGERMOND, J. A classification of software components commonly used in Geographic Information Systems. In: MARBLE, D.; PEUQUET, D. **Introductory readings in Geographic Information Systems**. London: Taylor & Francis, 1990. p. 30-51.

DÍAZ, J. A.; FERNÁNDEZ, E. Hybrid scatter search and path relinking for the capacitated p-median problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 169, n. 2, p. 570-585, 2006.

DIBBLE, C.; DENSHAM, P. J. Generation interesting alternatives in GIS and SDSS using genetic algorithms. In: AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING/AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, 1993, Bethesda. **Proceedings...**Bethesda: [s.n], [1993?].v.1, p.180-189.

FIGUEIREDO, E. O.; LIMA, Q. S. **Coefficientes técnicos para inventário e manejo florestal com emprego do modelo digital de exploração florestal (Modelflora)**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2008. (Comunicado Técnico).

FLISBERG P.; FORSBERG M.; RÖNNQVIST. M. Optimization based planning tools for routing of forwarders at harvest areas. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 37, n. 11, p. 2153-2163, Nov. 2007.

FRANÇA, P. M.; SOSA, N. M.; PUREZA, V. An adaptive tabu search algorithm for the capacitated p-median problem. **International Transactions in Operational Research**, Oxford, v. 6, n. 6, p. 665-678, Nov.1999.

GALVÃO, R. D.; CHIYOSHI. F. A statistical analysis of simulated annealing applied to the p-median problem. **Operations Research**, Baltimore, v. 96, p 61-74, 2000.

GALVÃO, R. D. Modelos e algoritmos para problemas de localização em redes. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 3-22, 1981.

GALVAO, R. D.; RAGGI, L. A. A method for solving to optimality uncapacitated location problems. **Annals of Operations Research**, Amsterdam, v. 18, n. 1, p. 225-244, 1989.

GAMA, J. R. V.; BENTES-GAMA, M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Manejo sustentado para floresta de várzea na Amazônia oriental. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 719-729, 2005.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and intractability, a guide to the theory of NP-completeness**. 1. ed. New York: Freeman, 1979.

GARFINKEL, R. S.; NEEBE, A. W.; RAO, M. R. An algorithm for the m-median plant location problem. **Transportation Science**, Baltimore, v. 8, n.3, p. 217-236, 1974.

GHOSEIRI, K.; GHANNADPOUR, S. F. An efficient heuristic method for capacitated P-Median problem. **International Journal of Management Science and Engineering Management**, [S.l.], v. 4, n. 1, p.72-80, 2009.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and linkage to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, New York, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986.

GOMIDE, L. R.; MOURA, A. L. M.; MELLO, J. M. Simulação otimizada da exploração florestal de impacto reduzido em uma mata nativa localizada em Lavras, MG. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 20., 2011, Lavras.

GOMIDE, L. R. **Planejamento Florestal Espacial**. 2009. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

GREENPEACE. **Face a face com a destruição**: relatório Greenpeace sobre as companhias multinacionais madeireiras na Amazônia Brasileira. São Paulo: [s.n.], 1999. 21 p.

HAKIMI, S. L. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems, **Operations Research**, Baltimore, v. 13, n. 3, p. 462, 1965.

HAKIMI, S. Optimum location of switching centers and absolute centers and the medians of a graph. **Operations Research**, Baltimore, v. 12, n. 3, p. 450-459, 1964.

HENDRISON, J. **Controlled logging in managed tropical rain forests in Suriname**. Wageningen: Agricultural University, 1989. 204 p.

HENDRISON, J. **Damage-controlled logging in managed tropical rain forest in Suriname** Dissertation. Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 1990.

HERTZ, A; WIDMER, M. Guidelines for the use of meta-heuristics in combinatorial optimization. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 151, n. 2, p. 247-252, 2003.

HIGUCHI, N. O desmatamento insustentável na Amazônia. **Ciência Hoje**, São Paulo, v. 39, p. 67-71, nov. 2006.

HOLMES, T. P. et al. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.163, n.1-3, p. 93-110, 2002.

HONER, D. **Resolução do problema das p-medianas não capacitado: comparação de algumas técnicas heurísticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

HOSAGE, C. M.; GOODCHILD, M. F. Discrete space location-allocation solutions from genetic algorithms. **Annals of Operational Research**, [S.l.], v.6, n. 2, p. 35-46, 1986.

JÄRVINEN, P.; RAJALA, J.; SINERVO, H. A branch-and-bound algorithm for seeking the p-median. **Operations Research**, Baltimore, v. 20, p. 173-178, 1972.

JONES, D. F.; MIRRAZAVI, S. K.; TAMIZ, M. Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-art. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 137, p. 1-19, 2002.

KARIV, O.; HAKIMI, S. L. An algorithmic approach to network location problems.ii: The p-medians. **SIAM Journal on Applied Mathematics**, Philadelphia, v. 37, n. 3, p. 539-560, 1979.

KAVEH, P.; ZADEH, A. S.; SAHRAEIAN, R. Solving capacitated p-median problem by hybrid k-means clustering and FNS algorithm. **International Journal of Innovation, Management and Technology**, [S.l.], v. 1, n. 4, p. 405-410, Oct. 2010.

KOSKOSIDIS, Y. A.; POWELL, W. R. Clustering algorithms for consolidation of costumes orders into vehicle shipments. **Transportation Research**, Oxford, v. 26, p. 365-379, 1992.

KUEHN, A. A.; HAMBURGER, M. A heuristic program for locating warehouses. **Management Science**, Providence, v. 9, n. 4, p. 643-666, 1963.

LAURINI, R.; THOMPSON, D. **Fundamentals of spatial information systems**. San Diego: Academic Press, 1992.

LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. A expansão madeireira na Amazônia. **Revista da Madeira**, [S.l.], ago. 2006. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira.php>>. Acesso em: 01 jun. 2012.

LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; SOBRA, L. **Fatos florestais da Amazônia**. Belém: IMAZON, 2003.

LIMA, M. P. Methodology for planning log stacking using geotechnology and operations research. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, jul./set. 2011.

LORENA, L. A. N.; FURTADO, J. C. Constructive genetic algorithm for clustering problems. **Evolutionary Computation**, Cambridge, v. 9, n. 3, p. 309-327, Fall, 2001.

MALINOVSKI, R. A et al. Otimização da distância de extração de madeira com forwarder. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 171-179, set. 2008.

MANIEZZO, V.; MINGOZZI, A.; BALDACI, R. A bionomic approach to the capacitated p-median problem. **Journal of Heuristics**, Boston, v. 4, n. 3, p. 263-280, Sept. 1998.

MARANZANA, F. E. On the location of supply points to minimize transport costs. **Operational Research Quarterly**, London, v. 15, n. 3, p. 261-270, 1964.

MARSTEN, R. E. **An algorithm for finding almost all of the medians of a Network**. [S.l.]: Northwestern University, 1972. (Discussion Paper, 23).

MATEUS, G.R.; SILVA, R.M.A.; RESENDE, M.G.C. GRASP with path-relinking for the generalized quadratic assignment problem. **Journal of Heuristics**, Boston, v. 17, p. 527-565, 2011.

MEDEIROS, C. B.; PIRES, F. Databases for GIS. **SIGMOD Record**, New York, v. 23, n. 1, p. 107-115, 1994.

MENON, M. U. **Meta-heurísticas na otimização do sortimento florestal**. 2005. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MERINO, E. D.; PÉREZ, J. M.; ARAGONÉS, J. J. Neural networks algorithms for the p-median problem. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, 11., 2003, Belgium. **Proceedings...** Belgium: [s.n.], 2003. p. 385 – 391.

MLADENOVIC, N. et al.: The p-median problem: a survey of metaheuristic approaches. **European Journal of Operational Research**. Amsterdam, v. 179, n. 3, p. 927-939, Jun. 2007.

MULVEY, J. M.; BECK M. P. Solving capacitated clustering problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 18, n. 3, p.339-348, 1984.

OLIVEIRA, A. N; AMARAL, I. L. Florística e fitossociologia de uma floresta vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 34, n. 1, p.21-34, 2004.

OSMAN, I. H.; CHRISTOFIDES, N. Capacitated clustering problems by hybrid simulated annealing and tabu search. **International Transactions in Operational Research**, Oxford, v. 1, n. 6, p. 317-336, Oct. 1994.

PEREIRA, J. M.; ARAÚJO, E. A.; BARDALES, N. G. Características gerais do Acre. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CLASSIFICAÇÃO E CORRELAÇÃO DE SOLOS (RCC): SOLOS SEDIMENTARES EM SISTEMAS AMAZÔNICOS - POTENCIALIDADES E DEMANDAS DE PESQUISA, 9., 2010, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: Embrapa/Governo do Acre/UFRRJ, 2010, p. 11-20.

PILEGGI, G. C. F.; MORABITO, R.; ARENALES, M. N. Abordagens para otimização integrada dos problemas de geração e sequenciamento de padrões de corte: caso unidimensional. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 417-447, 2005.

PINTO, A. C. M. et al. Análise de danos de colheita de madeira em floresta tropical úmida sob regime de manejo florestal sustentado na Amazônia Ocidental. **RevistaÁrvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 459-466, jul./ago. 2002.

PIRKUL, H. Efficient algorithms for the capacitated concentror location problem. **Computers and Operations Research**, New York, v. 14, n. 3, p. 197-208, 1987.

PUTZ, F. E.; DYKSTRA, D.; HEINRICH, R. Why poor logging practices persist in the tropics. **Conservation Biology**, Boston, v. 14, n. 4, p. 951-956, 2000.

RESENDE, M. G. C.; RIBEIRO, C. C. Grasp with path-relinking: recent advances and applications. In: IBARAKI, T.; NONOBE, K.; YAGIURA M. (Ed.). **Metaheuristics: progress as real problem solvers**. [s.n.]: Springer, 2005. p. 29-63.

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

REVELLE, C. S.; SWAIN, R. W. Central facilities location. **Geographical Analysis**, Columbus, v. 2, n.1, p. 30-42, 1970.

RODRIGUES, F. L. Metaheurística simulated annealing para soluções de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 247-256, 2004.

SABOGAL, C. et al. **Silvicultura na Amazônia brasileira: avaliação de experiências e recomendações para implementação e melhoria dos sistemas**. Belém: CIFOR, 2006. 190 p.

SANTOS, P. M.; SOARES, M. S.; ARROYO, J. E. C. **Heurística grasp bi-objetivo para o problema das p-medianas não capacitado**. Rio de Janeiro: SPOLM, 2009.

SCHILLING, D. A.; ROLLAND, E.; CURRENT, J. R. An efficient tabu search procedure for the p-median problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 96, n. 2, p. 329-342, Jan. 1997.

SILVEIRA, R.; MORABITO, R. Um método heurístico baseado em programação dinâmica para o problema de corte bidimensional guilhotinado restrito. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 9, n. 1, p. 78-92, 2002.

SUN, M. Solving the uncapacitated facility location problem using the tabu search. **Computers & Operations Research**, New York, v. 33, n. 9, p. 2563-2589, Sept. 2006.

SWAIN, R. W. A parametric decomposition approach for the solution of uncapacitated location problems. **Management Science**, Providence, v. 21, n. 2, p. 189-198, Oct. 1974.

TANAKA, O. P. Exploração e transporte da cultura do eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, n. 141, p. 24-30, 1986.

TEITZ, M. B.; BART, P. Heuristic methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph. **Operations Research**, Baltimore, v. 16, n. 5, p. 955-961, 1968.

UHL, C. et al. **Uma abordagem integrada de pesquisa sobre o manejo dos recursos naturais na Amazônia**. Belém: Imazon, 1997. (Série Amazônia, 7).

WEINTRAUB, A.; ROMERO, C. Operations research models and the management of Agricultural and Forestry Resources: a review and comparison. **Interfaces**, Providence, v. 36, n. 5, p. 446-457, 2006.

WYATT-SMITH, J. **The management of tropical moist forest for sustained production of timber**: some issues. London: IIED Earthscan, 1987. 20 p. (IUCN/IIED. Tropical forests policys paper, 4).

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1 Comparação de métodos de otimização para a locação ótima de pátios de estocagem de madeira

RESUMO

As florestas tropicais possuem uma grande diversidade de espécies de valor comercial. Com isso a atividade de retirada desses recursos florestais é intensa. Entretanto, as atuais práticas de colheita florestal têm causado danos ambientais e um grande desperdício. As técnicas de Exploração de Impacto Reduzido estão sendo utilizadas e estudadas no sentido de diminuir os danos causados pela exploração convencional em função do manejo sustentável. Desta forma, esse estudo tem como objetivo apresentar uma metodologia que integra o uso de geotecnologias e métodos de otimização para auxiliar na exploração florestal visando à locação ótima de pátios de estocagem. Os problemas de otimização utilizados foram o P-Mediana e sua variação P-Mediana Capacitado e os métodos de otimização utilizados foram à programação linear inteira (método exato) e uma metaheurística híbrida (método aproximado). A partir das restrições geradas pelo sistema de informação geográfica foram gerados comparativos entre os métodos de otimização. Os resultados mostram que o método aproximado apresentou valores muito próximos e muitas vezes iguais ao ótimo apresentado pelo método exato com eficácia na maioria das vezes de 100% com o tempo de processamento bem menor. Os resultados encontrados no estudo, mesmo não validados em campo, foram considerados satisfatórios no planejamento da extração de madeira, já que foram utilizados métodos embasados cientificamente e não mais intuitivos ou empíricos como é realizado atualmente, e que facilitariam as atividades de campo.

Palavras-chave: Geotecnologia. Métodos de Otimização. P-mediana capacitado. Exploração de Impacto Reduzido.

ABSTRACT

Tropical forests have a great diversity of species of commercial value. Thus, the removal of the forest resources is intense. However, the present forest harvesting practices have been causing environmental damages and a large waste. Reduced Impact Exploitation techniques are being used and studied with the objective of reducing the damage caused by conventional exploitation due to of sustainable management. Therefore, this study aimed at presenting a methodology which integrates the use of geo-technologies and optimization models to assist in forest exploitation seeking optimum storage yard location. The used optimization problems were P-Median and its variation Capacitated P-Median and the optimization methods used were integer linear programming (exact method) and hybrid metaheuristic (approximate method). With the generated restrictions by the geographic information system were created comparatives between the optimization methods. The results show that the approximate method presented values very close and sometimes equal to the optimum value presented by the exact method with a majority of 100% efficiency with smaller processing time. The results found in the study, though not validated in the field, were considered satisfactory in timber extraction planning, since scientifically based methods were used rather than the more intuitive or empiric as are used presently, and facilitated field activities.

Key-words: Geo-technology. Optimization methods. Capacitated P-Median. Reduced Impact Exploitation.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento da exploração florestal é peça fundamental no manejo das florestas tropicais. O bom planejamento, além de reduzir os custos de exploração, pode reduzir o dano à floresta remanescente, garantindo novas extrações econômicas no futuro (DYKSTRA; HEINRICH, 1996).

Uma das principais ferramentas do planejamento florestal moderno é a Pesquisa Operacional (PO). Os métodos de PO buscam formas de resolver problemas de otimização, muito úteis ao planejamento de maneira geral e especificamente à exploração de impacto reduzido. Os problemas de otimização são problemas de maximização ou minimização de funções de uma ou mais variáveis num determinado domínio, sendo que, geralmente, existe um conjunto de restrições a que estão sujeitas as variáveis de interesse.

Dentre os problemas de otimização pode-se citar o problema de localização de instalações, conhecido como P-Medianas (PM). Esse é um problema clássico de localização de instalações, cujo objetivo é localizar p instalações (medianas) de forma a minimizar o custo total (a soma das distâncias de cada vértice à sua mediana mais próxima) (ARAKAKI, 2002). Gomide, Moura e Melo (2011) usaram o modelo empregado no problema de P-medianas para encontrar os melhores locais para instalação de pátios de estocagem em uma área menor e com a diferença. Este modelo seleciona as árvores diferentes do modelo apresentado neste trabalho que utilizou as árvores para exploração selecionadas no inventário florestal. Outra diferença está no limite volumétrico, que neste trabalho teve uma variação de 5% pra mais (capacidade máxima) e pra menos (capacidade mínima). Os resultados mostraram que este tipo de modelo auxilia o micro planejamento e reduz o impacto na floresta.

Uma variação do problema de P-medianas clássico é o P-Mediana Capacitado (PMC) que considera capacidades de serviços para cada mediana,

sendo que o total de serviço demandado pelos vértices não pode exceder as capacidades.

PMC é considerado um problema NP-Difícil e, devido à sua complexidade, os algoritmos exatos têm dificuldade em resolver as situações encontradas no mundo real. Por este motivo a maioria das soluções para este tipo de problema é baseada em métodos heurísticos. Vários métodos heurísticos já foram propostos na literatura para resolver o PM e o PMC.

Pirkul (1987) descreve um algoritmo *Branchand Bound* que utiliza a relaxação Lagrangeana nas restrições de particionamento para problemas PMC. Alguns outros trabalhos aplicam a heurística Lagrangeana para resolver PM (BARCELOS; PIZZOLATO; LORENA, 2004) e PMC (KOSKOSIDIS; POWELL, 1992), (MULVEY; BECK, 1984).

Outras abordagens aplicam metaheurísticas para resolver estes problemas como Busca Tabu (GLOVER, 1986), (FRANÇA; SOSA; PUREZA, 1999) e Algoritmos Genéticos (MANIEZZO; MINGOZZI; BALDACI, 1998), (LORENA; FURTADO, 2001) e (GHOSEIRI; GHANNADPOUR, 2009).

Outros autores utilizam metaheurísticas híbridas como (OSMAN; CHRISTOFIDS, 1994) que implementaram um algoritmo de busca tabu e o método de *Simulated Annealing* para PMC. Resende e Werneck (2004) combinaram elementos de diversas metaheurísticas como o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), Busca Tabu e Algoritmos Genéticos para resolver problemas PM. Outros trabalhos como (KAVEH; ZADEH; SAHRAEIAN, 2010) e (DÍAZ; FERNÁNDEZ, 2006) também utilizam metaheurísticas híbridas.

A Pesquisa Operacional tem sido utilizada em conjunto às geotecnologias como o Sensoriamento Remoto (SR), os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e os Sistemas de Posicionamento Global (GPS).

Há um crescimento no uso de metaheurísticas na área de engenharia florestal nos últimos anos. Rodrigues et al. (2004) desenvolveram e testaram a metaheurística *Simulated Annealing* (SA) para solução de problemas de gerenciamento florestal com restrições de integridade. A melhor configuração de parâmetros propiciou à SA eficácia (calculada pela razão entre os valores das funções objetivo) média de 95,36%, valor mínimo de 83,66%, valor máximo de 100% e coeficiente de variação igual a 3,18% do ótimo matemático obtido pelo algoritmo exato *branch and bound*. Para o problema de maior porte, a eficiência (medida pelo tempo de processamento) da SA foi dez vezes superior à eficiência do algoritmo exato *branch and bound*. O bom desempenho desta heurística reforçou as conclusões, tiradas em outros trabalhos, do seu enorme potencial para resolver importantes problemas de gerenciamento florestal de difícil solução pelos instrumentos computacionais da atualidade. Outros trabalhos como (SILVEIRA; MORABITO, 2002), (PILEGGI; MORABITO; ARENALES, 2005), (MENON, 2005) e (GOMIDE, 2009) utilizam metaheurísticas para resolver problemas de engenharia florestal.

Dentre os trabalhos encontrados na literatura que utilizam metaheurísticas em problemas da engenharia florestal não foi encontrado nenhum que utiliza este método de otimização para auxiliar na locação de pátios de estocagem em florestas nativas. Atualmente este planejamento é realizado de forma empírica, sem nenhuma otimização.

Portanto, existe uma necessidade de se otimizar a forma com que os pátios de estocagem são criados para diminuir os custos gastos durante a construção dos mesmos e diminuir o impacto nas árvores remanescentes.

Problemas de localização podem ser usados para otimizar a localização dos pátios de estocagem. O termo instalação pode ser substituído por pátios. Em geral, várias instalações serão localizadas, que por sua vez, serão alocados aos seus clientes, que podem ser as árvores. A maioria dos problemas de localização

de instalações é considerada de difícil solução, alguns desses problemas pertencem a classe NP-difícil (*NP-hard*) (GAREY; JOHNSON, 1979). Assim, o esforço computacional para a sua solução cresce exponencialmente. Deste modo, é praticamente impossível resolver problemas reais de grande porte através dos métodos exatos, por isso a necessidade da utilização de heurísticas/metaheurísticas para resolver o problema.

Seria o emprego de métodos heurísticos/metaheurísticos mais adequados do que os métodos de Programação Linear Inteira na solução de problemas de locação de pátios na Amazônia brasileira, devido à natureza combinatória desse problema? Esta é a pergunta científica que este trabalho irá responder.

O objetivo geral foi utilizar métodos de otimização em conjunto com sistema de informação geográfica para auxiliar no planejamento da locação de pátios de estocagem de madeira.

Os objetivos específicos foram:

- a) Determinar a solução ótima dos locais para instalação de pátios de estocagem, utilizando técnicas de análise espacial e um método exato através da programação linear inteira sem considerar o volume de madeira (problemas PM) e considerando o volume de madeira (problemas PMC);
- b) Determinar a solução aproximada dos melhores locais para instalação de pátios, utilizando técnicas de análise espacial e um método aproximado através de uma metaheurística híbrida sem considerar o volume de madeira (PM) e considerando o volume de madeira (PM);
- c) Comparar os resultados encontrados na programação linear inteira e na metaheurística para os problemas PM e PMC.

Este trabalho visa auxiliar as empresas e madeireiras no planejamento da construção de pátios de estocagem com custos menores e principalmente um menor impacto nas árvores remanescentes na exploração de florestas nativas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Foram utilizadas duas áreas diferentes neste trabalho. A primeira área está localizada na Fazenda Pica - Pau no município de Almerim, região norte do estado do Pará como mostra a Figura 1 (a). A segunda área esta localizada na Fazenda Canary no município de Bujari, região noroeste do estado do Acre como mostra a Figura 1 (b).

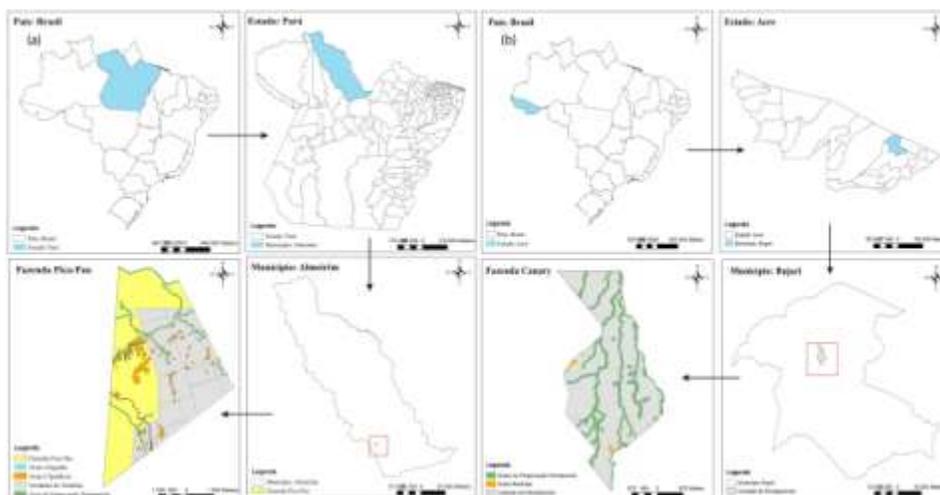


Figura 21 Localização da área de estudo. (a) Área localizada no estado do Pará e (b) Área localizada no estado do Acre

A Figura 2 (a) apresenta o mapa da Fazenda Pica-Pau, localizada no estado do Pará com mais detalhes com informações sobre a divisão das unidades de trabalho (UTs), localização das áreas de preservação permanente, áreas cipoáticas e áreas alagadas. Na Figura 2 (b) é apresentada a divisão numerada das UTs adotada neste estudo.

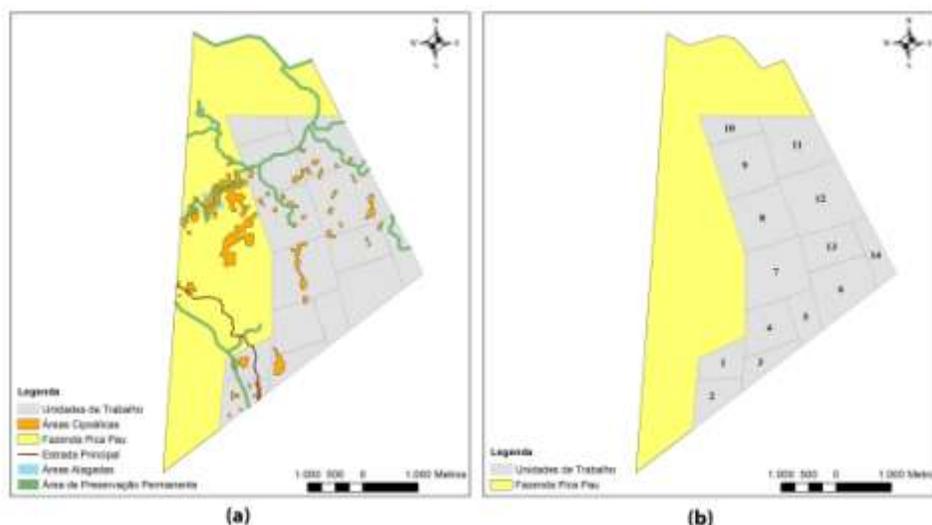


Figura 22 Detalhes da Fazenda Pica-Pau (a) e divisão numerada das UTs utilizadas neste estudo (b)

A Figura 3 (a) apresenta um mapa mais detalhado da unidade de produção anual (UPA) da Fazenda Canary. Este mapa mostra a localização das áreas de preservação permanentes (APP) e das áreas restritas que são zonas restritivas para alocação de pátios e estradas cuja declividade é superior a 12%.

Esta unidade de produção anual, no plano de manejo utilizado na Fazenda Canary, não foi dividida em unidades de trabalho como a área mostrada anteriormente. Para melhorar o entendimento da metodologia e resultados desenvolvidos neste trabalho, esta unidade de produção anual foi dividida em 16 unidades de trabalho. Essa divisão é mostrada na Figura 3 (b).

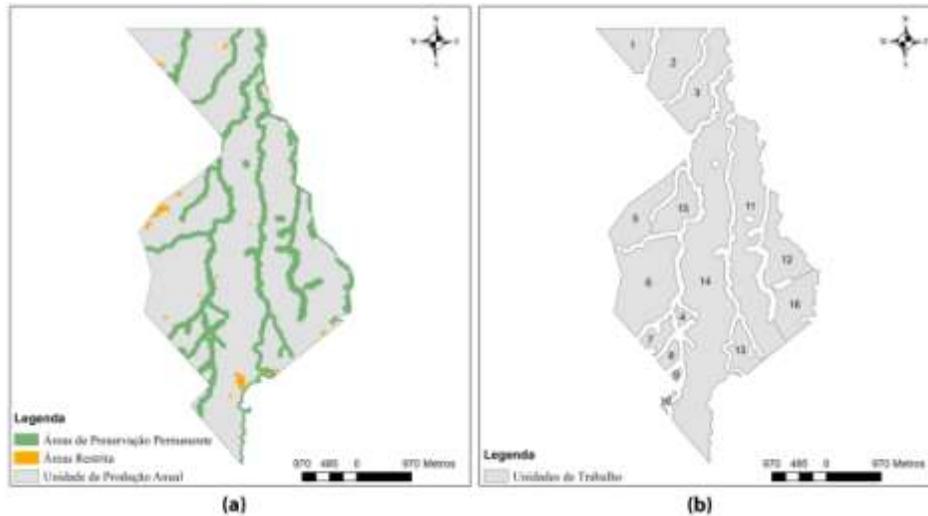


Figura 23 Detalhes da Fazenda Canary (a) e a divisão das unidades de trabalho que foram utilizadas neste estudo

2.2 Obtenção dos dados

Os dados da Área Pará foram disponibilizados pela Juruá Florestal Ltda. O conjunto de dados iniciais foi disponibilizado em formato vetorial compatível com o sistema de informações geográficas. Este conjunto refere-se à área e perímetro das unidades de trabalho e da fazenda, estradas (principal e secundária) existentes na área, áreas de igarapés, hidrografia da região, áreas cipoólicas, curvas de nível e o inventário florestal.

Os dados da Área Acre também foram disponibilizados no formato vetorial pela Embrapa Acre. Foram disponibilizados dados como: estradas existentes, inventário florestal, curvas de nível, áreas restritas e áreas de preservação permanente.

2.3 Métodos

O processamento dos dados foi realizado em duas etapas, sendo a primeira etapa uma análise geográfica e a segunda aplicando a otimização.

A análise geográfica foi utilizada para identificar os melhores locais para criação dos pátios de estocagem (locais planos, fora de APP e de áreas restritas, locais sem árvores remanescentes) e a otimização foi utilizada para localizar dentre os locais identificados pela análise geográfica os locais ótimos para instalação dos pátios levando em consideração a distância entre árvore-pátio.

2.3.1 Análise Geográfica

A análise geográfica foi desenvolvida em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e seguiram-se as seguintes restrições geográficas para determinar a região de soluções factíveis, ou seja, os locais onde se pode construir pátios de estocagem:

- a) Inclinação do terreno (obtida a partir das curvas de nível) – os pátios devem ser criados em lugares planos. A restrição utilizada foi que os pátios não podem ser criados em áreas com inclinação acima de 15%. Dependendo da situação este valor pode ser modificado;
- b) Área de Preservação Permanente (APP): Os pátios não devem ser criados dentro de APP;
- c) Áreas Cipoálicas: Os pátios não devem ser criados dentro de áreas de cipós;
- d) Áreas Restritas: Os pátios não devem ser criados em áreas restritas. Estas áreas restritas foram definidas anteriormente pela empresa na área Acre;

- e) Árvores Remanescentes/Raras: Árvores remanescentes (portasementes) ou raras não podem ser derrubadas para criação de pátios.

Outras restrições geográficas podem ser criadas de acordo com os dados disponíveis da área, como tipo de solo, a localização de árvores com grande volume, localização de árvores remanescentes e protegidas por lei, estradas pré-existent na propriedade, entre outras restrições. Quanto maior o detalhamento da área, mais completo será o resultado das restrições geográficas.

2.3.2 Métodos de Otimização

Os problemas de otimização trabalhados neste estudo foram os problemas clássicos de localização de instalações P-Mediana (PM) e o P-Mediana Capacitado (PMC) e foram utilizados dentro da solução factível retornada pela análise geográfica. A seguir é apresentada a fórmula matemática utilizada do PMC adaptada para o problema de criação de pátios de estocagem.

$$\text{FO: } \textit{Min} (Z) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N d_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ está atribuído a instalação } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a instalação } j \text{ esta aberta} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^M V_i X_{ij} \leq VolPatio, \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_j = P \quad (4)$$

$$X_{ij} - Y_j \leq 0, \quad \forall j \quad (5)$$

$$X_{ij} = \{0; 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (6)$$

$$Y_j = \{0; 1\}, \quad \forall j \quad (6)$$

Onde:

- i – são as árvores (clientes). As árvores foram escolhidas a partir do inventário florestal de cada área estudada;
- j – são os pátios (fornecedores). Os pátios foram resultados da análise geográfica;
- d_{ij} – distância euclidiana entre a árvore i e o pátio j (metros). A matriz de distância euclidiana entre as árvores e pátios foi criada a partir de um arquivo gerado pelo SIG contendo as distâncias de todas as árvores para todos os pátios para cada unidade de trabalho da área Pará e para a UPA da área Acre;
- V_i – volume de madeira da árvore i (m^3). O volume utilizado foi retirado do inventário florestal de cada área estudada;
- $VolPatio$ – volume máximo de madeira que o pátio comporta (m^3). O volume de teste foi de $200 m^3$ para a área Pará e $1000 m^3$ para a área Acre.

P – número de pátios de estocagem que serão escolhidos (para serem criados). Este número foi escolhido de acordo com o problema. Nos PM o valor utilizado foi o mesmo número de pátios apresentado pelo plano de manejo florestal das áreas estudadas. No PMC foi através de uma fórmula matemática apresenta em (7) e explicada posteriormente.

A restrição (2) é a restrição de rota única que garante que cada árvore seja destinada a apenas um pátio de estocagem. A restrição (3) é a restrição de capacidade de armazenamento e garante que o pátio não receberá um volume de madeira acima do comportado por ele. A restrição (4) é a restrição de número de pátios que garante que o número de pátios não será maior que o valor estabelecido pelo usuário. Já a restrição (5) é a restrição de ligação de árvore-pátio. Por fim, (6) é a restrição binária do modelo de programação linear inteira, os resultados assumirão valores 0 ou 1.

A fórmula do modelo matemático para PM é praticamente a mesma mostrada anteriormente com exceção da restrição de capacidade e armazenamento (3).

Nos problemas PMC o número de pátios (P) foi escolhido através da fórmula matemática apresentada em (7).

$$P = \frac{Vol_{exp}}{Vol_{patio}} \quad (7)$$

Onde:

P = Número de pátios a serem criados

Vol_{exp} = Volume a ser explorado na unidade de trabalho (m^3)

Vol_{patio} = Volume máximo a ser estocado no pátio (m^3).

Para a área localizada no estado do Pará foi utilizado o valor de 200 m^3 para Vol_{patio} . Este valor foi escolhido com uma média entre as UTs, pois algumas apresentavam um alto volume a ser explorado, enquanto outras apresentavam um volume muito baixo. Este valor inicial foi escolhido principalmente para analisar o comportamento entre os métodos de otimização. Para a área localizada no estado do Acre foi utilizado o valor escolhido foi de Vol_{patio} foi de 1000 m^3 , uma média entre o volume a ser explorado nas UTs e devido ao alto volume a ser explorado nas unidades de trabalho.

O processamento da otimização foi realizado em um computador Intel® Core™ i3-2310 CPU @ 2.10GHz e 8GB de memória RAM e desenvolvido de duas formas:

Método exato - solução ótima através da Programação Linear Inteira (PLI) no Solver IBM ILOG CPLEX 12.4 utilizando o algoritmo *branch and cut*; e

Método aproximado - Solução aproximada através de uma metaheurística híbrida HYBRID desenvolvida por (RESENDE; WERNECK, 2004).

A metaheurística híbrida é um método que combina elementos de diversas metaheurísticas como o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), busca tabu e algoritmos genéticos. É uma metaheurística para resolver o problema de p -medianas não capacitado. Que foi modificada neste trabalho para resolver os problemas p -medianas capacitado.

O pseudocódigo da metaheurística híbrida é apresentado a seguir. Esta metaheurística é um método iterativo onde cada iteração consiste em construir uma solução através de um algoritmo construtivo, esta solução é então submetida a uma busca local e a solução retornada pela busca local é combinada com uma solução selecionada no conjunto de soluções elite (soluções

consideradas ótimas em cada iteração) por meio de um processo chamado religamento de caminhos (*path relinking*). Depois que todas as iterações foram realizadas o algoritmo tem uma segunda fase chamada de pós-otimização em que os valores das soluções “elite” são combinados entre si para obter a melhor entre elas, que será a solução final.

```

function HYBRID (semente, num_iter, tamanho_elite)
1   Gera Solução Aleatória (semente);
2   Inicia Elite (elite, tamanho_elite);
3   for i=1 to num_iter do
4       S ← Construção Aleatoria ( );
5       S ← Busca Local (S);
6       S' ← Seleciona (elite, S);
7       if (S ≠ NULL) then
8           S' ← Religamento Caminhos(S, S');
9           Adiciona (elite, S');
10      endif
11      Adiciona (elite, S);
12  endfor
13  S ← PosOtimizacao (elite);
14  return S;
end HYBRID

```

Este algoritmo desenvolvido em C++ e de código fonte aberto foi modificado para poder ser usado em problemas P-Medianas Capacitado (PMC).

A diferença entre os problemas PM e PMC esta na restrição de capacidade, ou seja, em um problema PMC a capacidade da instalação deve ser levada em consideração na hora de se criar uma solução, ou seja, a soma de todos os clientes alocados para a instalação não deve ultrapassar sua capacidade.

Na metaheurística, a solução é criada de forma gulosa, ou seja, os valores da solução vão sendo inseridos gradativamente. Antes dos valores serem adicionados na solução (árvore e seu respectivo pátio) é feita uma verificação da capacidade do pátio que esta sendo inserido na solução para saber se é possível ou não alocar ou não a árvore neste pátio.

Conforme as árvores vão sendo inseridas na solução o volume disponível do pátio vai sendo calculado através da fórmula (8).

$$VolDisp(f) = VolPatio - \sum_i^N VolArvores(i) \quad (8)$$

Onde:

VolDisp(f): Representa o volume disponível no pátio *f* (valor da instalação na solução atual);

VolPatio: Volume do pátio. Este valor é uma constante e neste trabalho não tem diferença entre os pátios;

i: este valor representa o índice das árvores existente na solução atual que está alocada ao pátio *f*. Foi utilizado um vetor chamado *solution* onde sua posição representa a árvore e o valor em sua posição representa o pátio que esta árvore esta alocada. Para saber quais árvores (*i*) estão alocadas ao pátio *f*, basta verificar os índices do vetor *solution[i]* cujo valor são iguais a *f*. Onde *i* varia de 1 até o número de árvores e *f* é a instalação da solução atual.

VolArvores(i): representa o volume de cada árvore *i*.

Ao final do somatório *VolDisp(f)* se tem o volume disponível para ser armazenado no pátio *f*. Como o custo da solução é a soma das distâncias da solução, toda vez que o volume do pátio exceder sua capacidade, a solução irá sofrer uma penalidade (soma 1000 metros na distância) resultando um custo muito alto e tornando inviável seu uso como melhor solução.

2.3.3 Avaliação do desempenho da metaheurística

O desempenho da metaheurística (HYBRID) foi avaliado através da sua eficiência e eficácia. A eficiência foi calculada pela razão, expressa em porcentagem, entre o valor da função objetivo obtida pela metaheurística e a função objetivo do método exato (solução ótima), obtida pelo algoritmo *branch and cut*, como mostra a expressão (9).

$$Ef = \left[1 - \frac{FO_{aprox} - FO_{otimo}}{FO_{otimo}} \right] X 100 \quad (9)$$

Onde:

Ef = eficácia (%)

FO_{aprox} = valor da média das soluções obtidas pelo método aproximado depois de 100 execuções;

FO_{otimo} = valor da solução ótima obtida pelo algoritmo *branchand cut*.

A eficiência da metaheurística utilizada foi avaliada, utilizando-se apenas medidas de tempo de processamento do algoritmo, o que permite somente comparações relativas entre os métodos de solução, processadas ao utilizar os mesmos recursos computacionais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados da análise geográfica

A Figura4 (a) apresenta o resultado final da análise geográfica para a unidade de trabalho 14 da área localizada no estado do Pará e mostra em verde as áreas possíveis para o empilhamento de madeira e em cinza as áreas restritas para o empilhamento de madeira. A Figura 4 (b) apresenta o mesmo resultado para a unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre.

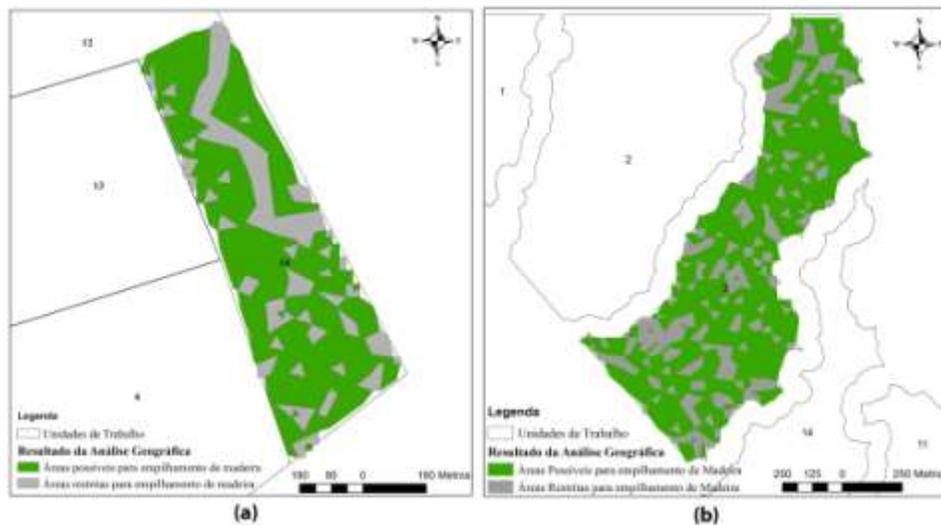


Figura 24 Resultado da análise geográfica para UT 14 localizada no estado Pará (a) e resultado da análise geográfica para UT 3 localizada no estado do Acre (b)

A partir do resultado apresentado na Figura 4 foi possível selecionar os melhores locais para locação dos pátios de estocagem que foram utilizados como entrada nos métodos de otimização (instalações). A Figura 5 apresenta a distribuição destes possíveis pátios para a unidade de trabalho 14 da área

localizada no estado do Pará (a) e para a unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre (b). Os pontos em vermelho apresentam a localização geográfica dos possíveis pontos para locação de pátios de estocagem na área. Estes pontos representam o centro de onde o pátio será construído.

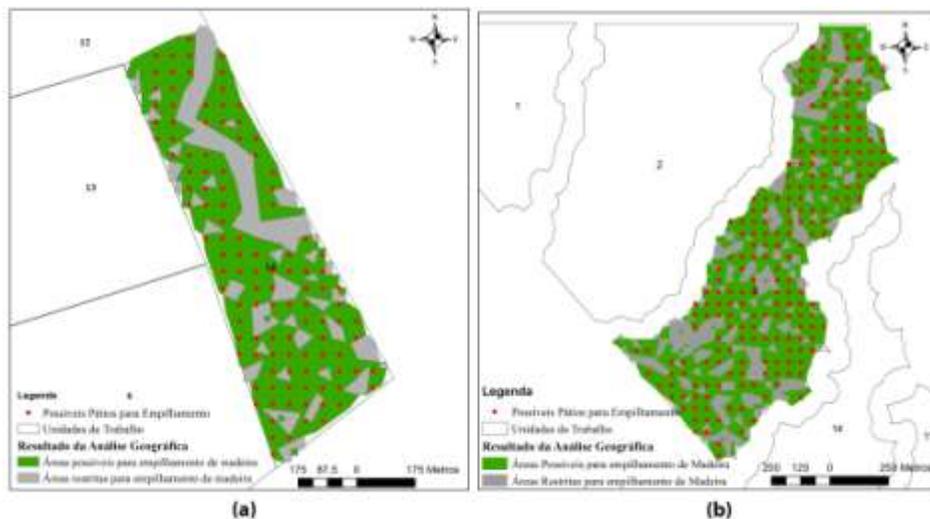


Figura 25 Resultado análise geográfica com a distribuição dos possíveis pátios para a UT 14 na área localizada no estado do Pará (a) e para a UT3 na área localizada no estado do Acre (b)

A Figura 6 apresenta a distribuição das árvores selecionadas para exploração (de acordo com o inventário florestal) que foram utilizadas como entrada nos métodos de otimização (clientes) em conjunto com a localização dos possíveis pátios de estocagem (instalações) mostrada anteriormente na Figura 6. Na Figura 6 (a) é apresentado a localização das árvores na unidade de trabalho da área localizada no estado do Pará e na Figura 6 (b) é apresentada a localização das árvores na unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre.

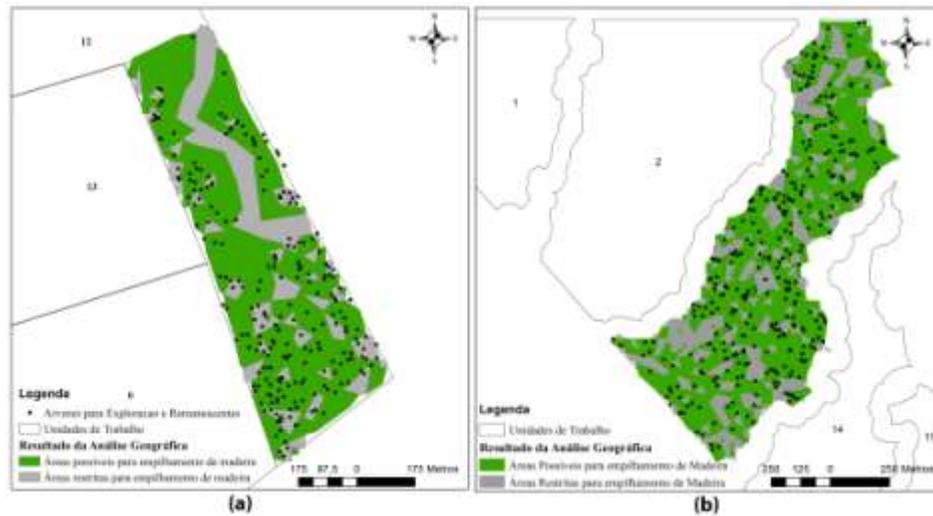


Figura26 Resultado da análise geográfica com a localização das árvores para exploração na UT 14 da área localizada no estado do Pará (a) e na UT3 da área localizada no estado do Acre (b)

3.2 Resultado dos métodos de otimização

Problemas de localização de instalações, dependendo da quantidade de medianas e instalações, podem apresentar um número grande de variáveis de decisão e restrições. Isso dificulta que o resultado seja encontrado através de um método exato devido à natureza combinatória do problema.

Neste trabalho foram utilizados 28 modelos matemáticos para a área localizada no estado do Pará, ou seja, dois modelos por unidade de trabalho, um para o problema PM e outro para o problema PMC.

A Tabela 1 apresenta o número de variáveis e o número de restrições do modelo matemático PM e PMC para cada unidade de trabalho utilizada da área localizada no estado do Pará.

Tabela4 Número de variáveis e restrições da área localizada no estado do Pará

UT	Nº de Árvores	Nº de Possíveis Pátios	Nº de Variáveis de decisão	Nº de Restrições PM	Nº de Restrições PMC
1	87	110	9.680	9.658	9.768
2	116	119	13.923	13.921	14.040
3	140	62	8.742	8.821	8.883
4	246	120	29.640	29.767	29.887
5	230	76	17.556	17.711	17.787
6	545	238	129.948	130.256	130.494
7	512	143	73.359	73.729	73.872
8	581	251	146.082	146.413	146.664
9	702	280	196.840	197.263	197.543
10	325	161	52.486	52.651	52.812
11	211	82	17.384	17.514	17.596
12	427	325	139.100	139.203	139.528
13	177	97	17.266	17.347	17.444
14	231	119	27.608	27.721	27.840

Antes da divisão das repartições na UPA localizada na área do estado do Acre, o modelo matemático resultou em um alto número de variáveis de decisão e restrições tanto para o modelo PM quanto para o modelo PMC. Ao todo as árvores para exploração foram 6.602 e o número de possíveis pátios igual a 3.469 gerando 22.905.807 variáveis de decisão, 22.908.941 restrições para o problema PM, 22.912.410 restrições para o problema PMC. Devido à natureza combinatória dos problemas PM e PMC tornou-se inviável em tempo computacional executar este modelo matemático no método exato proposto.

Por isso foram realizados testes iniciais utilizando o método aproximado e foi detectado um problema no resultado. Em alguns casos as árvores para serem alocadas no pátio selecionado deveriam ser arrastadas pela APP, o que não deve acontecer, pois causa um grande impacto ambiental e multas. Uma solução para resolver este problema seria o uso de penalidades, ou seja, colocar

valores altos na distância entre árvores e pátios que passam por APP. O problema dessa solução é que o número de variáveis continuaria alto e não seria possível obter um resultado pelo método exato.

Uma segunda solução encontrada e realizada foi dividir a área localizada no estado do Acre em partes menores e processar cada parte separadamente. Na hora da divisão levou-se em conta a camada de APP para garantir que nenhuma árvore fosse passar pela APP para acessar o pátio escolhido. Foram criadas 16 unidades de trabalho mostrada na Figura 3 (b), seção 2.1. A Tabela 2 apresenta o número de variáveis de decisão e o número de restrições originadas da divisão realizada.

Tabela 5 Número de variáveis de decisão e restrições das repartições da área localizada no estado do Acre

UT	Nº de Árvores	Nº de Possíveis Pátios	Nº de Variáveis de decisão	Nº de Restrição PM	Nº de Restrição PMC
1	195	137	26.852	26.911	27.048
2	433	245	106.330	106.519	106.764
3	498	224	111.776	112.051	112.275
4	34	15	525	545	560
5	264	174	46.110	46.201	46.375
6	714	417	298.155	298.453	298.870
7	55	69	3.864	3.851	3.920
8	51	43	2.236	2.245	2.288
9	14	11	165	169	180
10	11	11	132	133	144
11	1093	537	587.478	588.035	588.572
12	291	187	54.604	54.709	54.896
13	129	83	10.790	10.837	10.920
14	2299	1031	2.371.300	2.372.569	2.373.600
15	268	132	35.508	35.645	35.777
16	253	174	44.196	44.276	44.450

A Tabela 3 apresenta o resultado do método exato e do método aproximado para o Problema P-Mediana, ou seja, sem considerar o volume a ser estocado no pátio e considerando a mesma quantidade de pátios apresentada pelo plano de manejo florestal da área localizada no estado do Pará.

Tabela 6 Comparação entre o método exato e o método aproximado para resolver o problema PM nas unidades de trabalho da área localizada no estado do Pará

UT	NºArv.	V(m ³)	P	Método Exato			Método Aproximado			Eficácia
				Pátios selecionados	T(s)	F.O	Pátios selecionados	T(s)	M.S.	
1	87	393	3	38; 64; 69	3.56	9484	38; 64; 69	0.04	9488	99,96%
2	116	401	5	51; 54; 86; 97; 109	9.77	9260	51; 54; 86; 97; 109	0.04	9263	99,97%
3	140	824	2	19; 45	8.33	24052	19; 45	0.04	24048	100,02%
4	246	1122	4	6; 15; 71; 90	7.15	37951	6; 15; 71; 90	0.06	37951	100,00%
5	230	1053	3	19; 42; 69	13.88	31954	19; 42; 69	0.08	31952	100,01%
6	545	2223	6	9; 55; 68; 92; 182; 197	96.18	76317	9; 55; 68; 92; 182; 197	0.44	76325	99,99%
7	512	3117	5	16; 21; 56; 71; 90	48.14	88136	16; 21; 56; 71; 90	0.25	88154	99,98%
8	581	2817	8	39; 67; 82; 125; 146; 183; 210; 214	117.03	66674	39; 67; 82; 125; 146; 183; 210; 214	0.39	66672	100,00%
9	702	4282	7	47; 83; 91; 154; 161; 197; 217	173.79	89079	47; 82; 91; 154; 161; 197; 217	0.67	89075	100,00%
10	325	1536	3	50; 76; 122	41.36	46803	50; 76; 122	0.26	46813	99,98%
11	211	874	4	38; 72; 159; 202	36.43	33911	38; 72; 159; 202	0.29	33912	100,00%

“Tabela 3, conclusão”

UT	NºArv.	V(m ³)	P	Método Exato			Método Aproximado			Eficácia
				Pátios selecionados	T(s)	F.O	Pátios selecionados	T(s)	M.S.	
12	427	2061	7	64; 73; 125; 171; 211; 241; 309	60.14	53936	64; 73; 125; 171; 211; 241; 309	0.37	53938	100,00%
13	177	861	4	6; 49; 50; 63	11.66	25382	6; 49; 50; 63	0.06	25611	99,10%
14	231	963	3	25; 50; 61	16.11	33163	25; 50; 61	0.08	33177	99,96%

Onde: **UT** – Número da unidade de trabalho; **NºArv** – Número de árvores que serão exploradas na unidade de trabalho; **V(m³)** – Volume em m³ a ser explorado na unidade de trabalho; **Método Exato** – são os resultados do método exato *branch and cut*; **Método Aproximado** – resultados da metaheurística híbrida; **Pátios escolhidos** – pátios escolhidos pelos métodos de otimização; **T(s)** – tempo de execução do método em segundos; **F.O.** – valor da função objetivo em metros (m) do método exato; **M.S.** – média das melhores soluções retornadas pelo método aproximado depois de 100 execuções; **Eficácia** – diferença entre a função objetivo (F.O) do método exato com a melhor solução encontrada (M.S) no método aproximado (porcentagem)

Como pode ser observado ambos os métodos de otimização apresentaram resultados semelhantes com eficácia de 100% algumas unidades de trabalho. O método aproximado, como esperado, apresentou uma eficiência bem melhor se comparado com o método exato, ou seja, o tempo de execução foi bem menor.

A diferença mínima apresentada entre a função objetivo do método exato com a média das melhores soluções do método aproximado se deve ao fato que no método exato foi passado como entrada a matriz de distâncias euclidianas entre as árvores e pátios (que foi calculada em um SIG), enquanto no método aproximado foi passado como entrada a localização geográfica (X , Y) das árvores e pátios, o cálculo da distância euclidiana foi realizado durante a execução do método. A diferença aconteceu por causa de casas decimais diferentes entre as soluções, por isso que o método aproximado em alguns casos como na unidade de trabalho 3, 5, 8 e 9 apresenta a $M.S$ melhor que a $F.O$ do método exato, apresentando uma eficácia maior que 100% nas UTs 3 e 5.

Quando a diferença entre a $F.O$ e $M.S$ é um pouco maior como aconteceu na unidade de trabalho 13 (eficácia de 99,10%), significa que os pátios escolhidos foram os mesmos, mas as árvores foram alocadas em pátios diferentes entre as soluções. Isso pode ser observado para a unidade de trabalho 13 na Tabela 4 que apresenta a comparação das distâncias de arraste entre as soluções apresentadas na Tabela 3. A UT 13 é a única que apresenta uma variação um pouco maior na distância máxima de arraste, deixando claro que os pátios escolhidos foram os mesmos, mas a disposição entre árvore e pátio se encontra um pouco diferente.

Tabela 7 Comparação entre as distâncias resultantes dos métodos de otimização para o problema PM nas unidades de trabalho da área localizada no estado do Pará

UT	Método Exato				Método Aproximado			
	Dmin(m)	Dmax(m)	> 200 m (%)	> 400 m (%)	Dmin(m)	Dmax(m)	> 200 m (%)	> 400 m (%)
1	18	238	7%	0%	18	237	7%	0%
2	3	230	4%	0%	3	231	4%	0%
3	19	348	39%	0%	19	348	39%	0%
4	8	320	27%	0%	8	320	27%	0%
5	16	348	18%	0%	16	348	18%	0%
6	7	348	21%	0%	7	347	21%	0%
7	11	489	33%	2%	11	489	33%	2%
8	6	374	9%	0%	6	375	9%	0%
9	2	333	10%	0%	2	333	10%	0%
10	5	408	18%	0%	6	407	18%	0%
11	10	421	35%	2%	10	421	35%	2%
12	5	281	10%	0%	5	281	10%	0%
13	14	347	26%	0%	14	368	34%	0%
14	2	368	20%	0%	2	368	20%	0%

Onde: **UT** – Número da unidade de trabalho; **Método Exato** – são os resultados do método exato *branch and cut*; **Método Aproximado** – resultados da metaheurística híbrida; **Dmin**– Distância euclidiana mínima de arraste entre árvores e pátio (m); **Dmax** – Distância euclidiana máxima de arraste entre árvores e pátios (m); **> 200 m** – porcentagem de árvores com distância de arraste até o pátio superior a 200 m; **> 400 m** – porcentagem de árvores com distância de arraste até o pátio superior a 400 m.

Quanto mais distante o arraste, menor será a produtividade e maiores os custos. Braz e Oliveira (2001) sugere como uma distância de arraste média 150 a 200 metros, podendo atingir um máximo de 400 metros dependendo da situação.

A Figura 7 apresenta a distribuição geográfica resultante dos pátios selecionados na unidade de trabalho 14 pelos métodos de otimização para o problema PM. Tanto o método exato quanto o método aproximado apresentaram os mesmos pátios e a disposição árvore-pátio. Os pontos vermelhos apresentam

a localização dos pátios selecionados (34, 68 e 103). E os pontos verdes claro, azuis e verdes escuro representam a localização das árvores alocadas aos pátios.

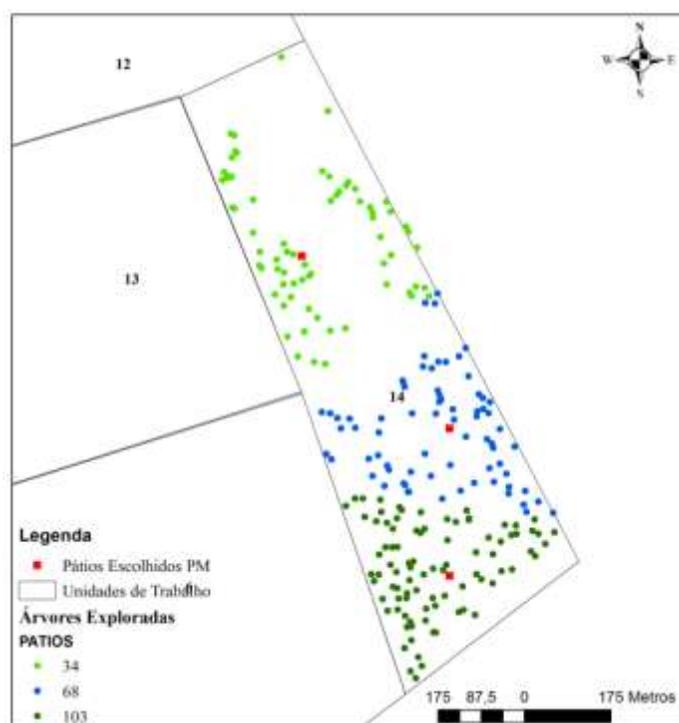


Figura 27 Localização geográfica dos pátios e suas respectivas árvores para o problema PM na área localizada no estado do Pará

A Tabela 5 apresenta a comparação dos resultados encontrados pelo método exato e o método aproximado do problema PM para cada uma das unidades de trabalho da área localizada no estado do Acre.

No problema PM foi utilizado o mesmo valor de P apresentado no plano de manejo em ambas as áreas estudadas.

As unidades de trabalho da área localizada no estado do Acre foram criadas de acordo com a camada de APP e por isso em alguns casos a unidade de trabalho ficou tão pequena que em campo não foi criado nenhum pátio, às

árvores contidas nestas unidades de trabalho foram arrastadas via APP para o pátio mais próximo em outra unidade de trabalho vizinha. Foi o que aconteceu com as UTs 4, 9 e 10, como nestas repartições não foi criado nenhum pátio em campo então os métodos de otimização para o problema PM não foram executados.

Tabela 8 Comparação entre o método exato e o método aproximado para resolução do problema PM na área localizada no estado do Acre

UT	NºArv.	V(m3)	P	Método Exato			Método Aproximado			Eficácia
				Pátios escolhidos	T(s)	F.O.	Pátios escolhidos	T(s)	M.S.	
1	195	1087	3	36; 62; 115	20.82	27.197	36; 62; 115	0.17	27.197	100,00%
2	433	2205	5	58; 82; 142; 173; 227	58.25	67.573	58; 82; 142; 173; 227	0.46	67.571	100,00%
3	498	2718	4	22; 74; 123; 188	53.51	89.268	22; 74; 123; 188	0.48	89.268	100,00%
4	34	170	0	Não executado			Não executado			-
5	264	1501	4	16; 39; 101; 148	19.78	40.043	16; 39; 101; 148	0.22	40.047	99,99%
6	714	4064	8	24; 89; 150; 203; 228; 312; 318; 388	230.42	109.823	24; 89; 150; 203; 228; 312; 318; 388	1.11	109.820	100,00%
7	55	346	1	49	6.20	8.714	49	0.03	8.714	100,00%
8	51	265	1	18	2.86	6.223	18	0.02	6.225	99,97%
9	14	80	0	Não executado			Não executado			-
10	11	71	0	Não executado			Não executado			-
11	1093	5787	9	Problema sem solução em tempo computacional			42; 106; 158; 207; 253; 313; 393; 441; 493	2.26	194.827	-
12	291	1454	3	26; 93; 168	23.07	58.891	26; 93; 168	0.33	58.893	100,00%

“Tabela 5, conclusão”

UT	NºArv.	V(m3)	P	Método Exato			Método Aproximado			Eficácia
				Pátios escolhidos	T(s)	F.O.	Pátios escolhidos	T(s)	M.S.	
13	129	736	1	36	21.63	29.683	36	0.07	29.675	100,03%
14	2299	13534	16	Problema sem solução em tempo computacional			31; 89; 140; 209; 263; 342; 399; 460; 521; 582; 653; 709; 782; 832; 915; 1002	7.74	437.304	-
15	268	1598	3	22; 62; 107	16.54	40.003	22; 62; 107	0.23	40.010	99,98%
16	253	1243	4	18; 65; 98; 135	29.24	35.289	18; 65; 98; 135	0.26	35.292	99,99%

Onde: **UT** – Número da unidade de trabalho da área Acre; **No Arv.** – Número de árvores exploradas na UT; **V(m3)** – volume em m3 a ser explorado na UT; **P** – número de pátios que foram criados nos métodos de otimização; **Método Exato** – são os resultados do método exato *branch and cut*; **Método Aproximado** – resultados da metaheurística híbrida; **Pátios escolhidos** – pátios escolhidos pelos métodos de otimização; **T(s)** – tempo de execução do método em segundos; **F.O.** – valor da função objetivo em metros (m) do método exato; **M.S.** – média das melhores soluções retornadas pelo método aproximado depois de 100 execuções; **Eficácia** – diferença entre a função objetivo (F.O) do método exato com a melhor solução encontrada (M.S) no método aproximado (porcentagem)

As repartições 11 e 14 foram consideradas problemas sem solução em tempo computacional para o método exato devido ao grande número de variáveis de decisão e restrições. Por isso a importância de se usar metaheurísticas para este tipo de problema.

Nas outras unidades de trabalho, ambos os métodos de otimização apresentaram resultados semelhantes com eficácia de 100% em quase todas Uts. O método aproximado, como esperado, apresentou uma eficiência bem melhor se comparado com o método exato, ou seja, o tempo de execução foi bem menor.

As repartições 2, 3, 6 e 13 apresentaram resultados melhores em M.S. no método aproximado devido à diferença das casas decimais entre os valores passados no método exato e usados no método aproximado.

A Tabela 6 apresenta a comparação entre as distâncias euclidianas de arraste das árvores até seus respectivos pátios (de acordo com o resultado apresentado na Tabela 5) mínimas e máximas em cada uma das unidades de trabalho da área localizada no estado do Acre.

As unidades de trabalho apresentaram uma variação muito parecida dos valores das distâncias mínimas e máximas, isso significa que nas soluções em ambos os métodos, o arraste árvore-pátio são praticamente iguais. As UTs 8 e 13 apresentaram uma variação maior, isso significa que entre as soluções houve diferença no arraste árvore-pátio, ou seja, os pátios escolhidos foram os mesmos, mas a distribuição das árvores nos pátios são diferentes entre os métodos, conseqüentemente as distâncias são diferentes também.

Tabela 9 Tabela de comparação das distâncias resultantes do método exato e do método aproximado dos problemas PM na área localizada no estado do Acre

UT	Método Exato				Método Aproximado			
	Dmin (m)	Dmax (m)	> 200 m (%)	> 400 m (%)	Dmin (m)	Dmax (m)	> 200 m (%)	> 400 m (%)
1	21	315	19%	0%	21	315	19%	0%
2	12	382	28%	0%	11	383	28%	0%
3	6	512	37%	1%	6	512	37%	1%
4	Não executado				Não executado			
5	11	530	21%	2%	11	530	21%	2%
6	9	342	28%	0%	9	342	28%	0%
7	33	373	35%	0%	33	373	35%	0%
8	8	247	16%	0%	15	251	10%	0%
9	Não executado				Não executado			
10	Não executado				Não executado			
11	Problema sem solução em tempo computacional				10	421	40%	0%
12	27	585	43%	9%	26	585	43%	9%
13	31	503	59%	6%	31	502	56%	4%
14	Problema sem solução em tempo computacional				6	516	8%	1%
15	10	337	23%	0%	11	337	23%	0%
16	9	297	16%	0%	9	297	16%	0%

Onde: **UT** – Número da unidade de trabalho da área Acre; **Método Exato** – são os resultados do método exato *branch and cut*; **Método Aproximado** – resultados da metaheurística híbrida; **Dmin**– Distância euclidiana mínima de arraste entre árvores e pátio (m); **Dmax** – Distância euclidiana máxima de arraste entre árvores e pátios (m); **> 200 m** – porcentagem de árvores com distância de arraste até o pátio superior a 200 m; **> 400 m** – porcentagem de árvores com distância de arraste até o pátio superior a 400 m.

A Figura 8 apresenta a distribuição geográfica dos pátios selecionados na unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre para o problema PM. Para esta unidade de trabalho, ambos os métodos de otimização apresentaram a mesma distribuição das árvores para seus respectivos pátios. Os pontos em vermelho apresentam a localização dos 4 pátios selecionados (22, 74,

123 e 188). Os pontos roxos, cinzas, verdes e azuis apresentam as árvores alocadas aos pátios 22, 74, 123 e 188 respectivamente.

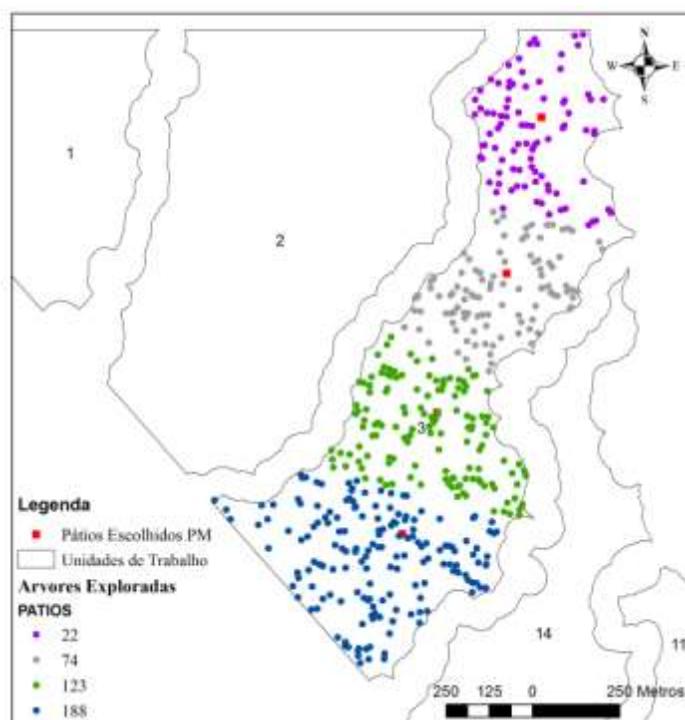


Figura 28 Localização geográfica das árvores e seus respectivos pátios resultantes do problema PM para a área localizada no estado do Acre

No problema PM não existe a restrição do volume que será estocado no pátio, sendo assim, em uma determinada área pode acontecer de um pátio receber um volume muito acima de sua capacidade.

O problema PM para localizar pátios de estocagem pode ser útil quando se utiliza a exploração quente, ou seja, a madeira é arrastada para o pátio e logo em seguida é carregada, sem a necessidade da estocagem de madeira no local por um longo período de tempo.

Quando se precisa estocar a madeira no pátio por um período de tempo maior, chamado de exploração fria, o ideal é analisar a capacidade que o pátio comporta e garantir que o volume de madeira a ser arrastado para este pátio não ultrapasse esta capacidade.

Para tentar resolver este problema, foi utilizada uma variação do problema PM conhecida como PMC. Neste problema a capacidade de armazenamento do pátio é uma restrição, ou seja, foi considerado um volume para o pátio definido pelo usuário. O número de pátios criados foi calculado através da fórmula (7) apresentada na metodologia.

Pelo fato do modelo PMC demorar mais tempo para retornar um resultado, no método exato foi estabelecido um tempo máximo de execução de 7200 segundos. O problema PMC foi executado para ambas as áreas de estudo através do método exato (*branch and cut*) e do método aproximado (metaheurística *hybrid*).

A Tabela 7 apresenta a comparação dos métodos de otimização para o problema PMC nas unidades de trabalho da área localizada no estado do Pará.

As unidades de trabalho 3, 6 e 8 apresentaram valores diferentes no método exato e aproximado, ou seja, para estes três casos o método aproximado não encontrou a solução ótima global.

As unidades de trabalho 9 e 12 não obtiveram uma solução dentro do tempo estabelecido para o método exato (7200 segundos).

Para as outras unidades de trabalho o método aproximado apresentou uma eficácia de 99% a 100% e uma eficiência bem melhor em relação ao método exato.

A Tabela 8 apresenta a comparação entre as distâncias euclidianas de arraste das árvores até seus respectivos pátios para todas as unidades de trabalho localizadas no estado do Pará de acordo com o resultado da Tabela 7.

Tabela 10 Comparação entre os métodos de otimização para o problema PMC na área localizada no estado do Pará

UT	N°Arv.	V(m ³)	P	Método Exato			Método Aproximado			Eficácia
				Pátios selecionados	T(s)	F.O	Pátios selecionados	T(s)	M.S.	
1	87	393	2	37; 69	6.75	11648	37; 69	0.5	11649	99,99%
2	116	401	3	51; 54; 95	12.61	12261	51; 54; 95	0.34	12265	99,97%
3	140	824	5	11; 12; 31; 32; 52	7.24	15368	11; 18; 31; 48; 53	0.8	16883	90,14%
4	246	1122	6	6; 15; 53; 59; 81; 106;	19.40	30070	6; 15; 53; 59; 81; 106;	1.03	30071	100,00%
5	230	1053	6	15; 16; 31; 37; 42; 69	19.79	23212	15; 16; 31; 37; 42; 69	1.01	23210	100,01%
6	545	2223	13	10; 32; 42; 47; 52; 93; 99; 124; 153; 174; 191; 196; 229	213.13	49838	9; 41; 46; 52; 93; 99; 124; 153; 174; 191; 196; 229	2.56	51759	96,15%
7	512	3117	16	2; 11; 16; 17; 18; 28; 29; 36; 47; 56; 61; 72; 82; 85; 123; 125; 128	411.44	51564	2; 11; 16; 17; 18; 28; 29; 36; 47; 56; 61; 72; 82; 85; 123; 125; 128	3.87	51566	100,00%
8	581	2817	15	39; 55; 60; 85; 92; 95; 108; 160; 165; 170; 179; 210; 214; 231; 245	2423.94	48972	39; 55; 60; 85; 92; 95; 108; 146; 165; 170; 196; 210; 231; 237; 245	6.05	50250	97,39%

“Tabela 7, conclusão”

UT	NºArv.	V(m ³)	P	Método Exato			Método Aproximado			Eficácia
				Pátios selecionados	T(s)	F.O	Pátios selecionados	T(s)	M.S.	
9	702	4282	22	Problema sem solução em tempo computacional			45; 49; 54; 75; 78; 81; 92; 108; 115; 121; 128; 146; 156; 165; 166; 177; 196; 200; 203; 218; 260; 264	15.03	46547	-
10	325	1536	8	29; 37; 54; 63; 112; 117; 142; 149	72.15	28307	29; 37; 54; 63; 112; 117; 142; 149	1.57	28313	99,98%
11	211	874	5	24; 72; 94; 159; 222	64.87	29957	24; 72; 94; 159; 222	1.30	29956	100,00%
12	427	2061	11	Problema sem solução em tempo computacional			40; 73; 103; 134; 156; 187; 215; 230; 256; 299; 309	12.09	41955	-
13	176	861	5	6; 35; 49; 57; 63	16.48	23636	6; 35; 49; 57; 63	1.13	23700	99,73%
14	231	963	5	30; 56; 84; 94; 110	12.45	24.966	30; 56; 84; 94; 110	0.9	24.966	100,00%

Onde: **UT** – Número da unidade de trabalho da área Pará; **NºArv.** – Número de árvores exploradas na UT; **V(m³)** – volume em m³ a ser explorado na UT; **P** – número de pátios que foram criados nos métodos de otimização; **Método Exato** – são os resultados do método exato *branch and cut*; **Método Aproximado** – resultados da metaheurística híbrida; **Pátios escolhidos** – pátios escolhidos pelos métodos de otimização; **T(s)** – tempo de execução do método em segundos; **F.O.** – valor da função objetivo em metros (m) do método exato; **M.S.** – média das melhores soluções retornadas pelo método aproximado após 100 execuções; **Eficácia** – diferença entre a função objetivo (F.O) do método exato com a melhor solução encontrada (M.S) no método aproximado (porcentagem)

Tabela 11 Comparação entre as distâncias resultantes no problema PMC para a área localizada no estado do Pará

UT	Método Exato				Método Aproximado			
	Dmin(m)	Dmax(m)	> 200 m (%)	> 400 m (%)	Dmin(m)	Dmax(m)	> 200 m (%)	> 400 m (%)
1	18	431	15%	1%	18	431	15%	1%
2	11	231	8%	0%	11	231	8%	0%
3	1	237	4%	0%	3	348	4%	0%
4	4	229	8%	0%	4	229	8%	0%
5	12	285	5%	0%	12	285	5%	0%
6	5	280	3%	0%	5	333	4%	0%
7	4	263	3%	0%	4	263	3%	0%
8	4	277	3%	0%	5	298	2%	0%
9	Problema sem solução em tempo computacional				5	206	0%	0%
10	2	268	1%	0%	2	268	1%	0%
11	5	375	6%	0%	5	375	6%	0%
12	Problema sem solução em tempo computacional				8	245	3%	0%
13	10	471	22%	1%	10	471	22%	1%
14	6	303	15%	0%	6	303	15%	0%

Onde: **UT** – Número da unidade de trabalho; **Método Exato** – são os resultados do método exato *branch and cut*; **Método Aproximado** – resultados da metaheurística híbrida; **Dmin**– Distância euclidiana mínima de arraste entre árvores e pátio (m); **Dmax** – Distância euclidiana máxima de arraste entre árvores e pátios (m); **> 200 m** – porcentagem de árvores com distância de arraste até o pátio superior a 200 m; **> 400 m** – porcentagem de árvores com distância de arraste até o pátio superior a 400 m.

A Figura 9 apresenta a distribuição geográfica dos pátios e suas respectivas árvores de acordo com o resultado do problema PMC para a unidade de trabalho 14 da área localizada no estado do Pará. Os pontos vermelhos representam a localização dos pátios escolhidos para esta UT. Os pontos azuis, verdes claro, cinzas, verdes escuros e roxos apresentam a localização das árvores que devem ser arrastadas para os pátios 30, 56, 84, 94 e 110 respectivamente.

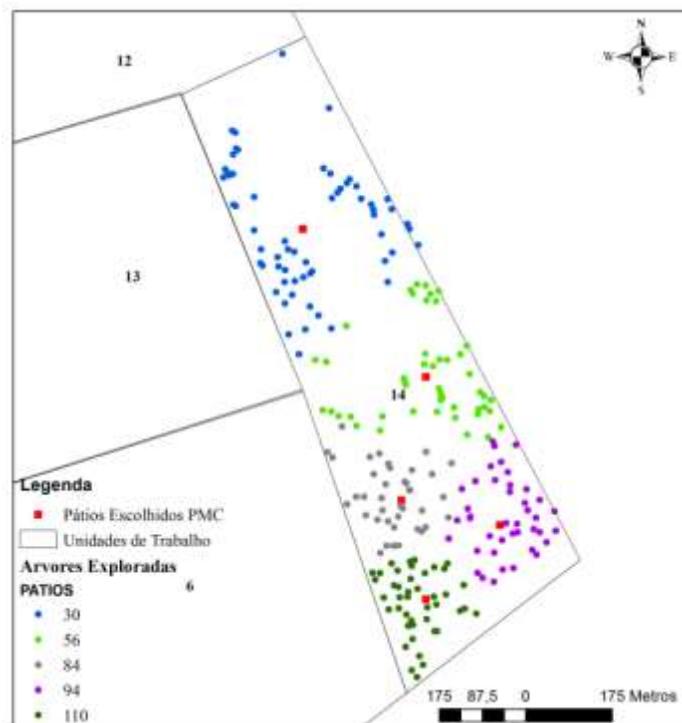


Figura 29 Distribuição geográfica dos pátios e suas respectivas árvores resultantes do problema PMC para a área localizada no estado do Pará

A Tabela 9 apresenta a comparação entre o método exato e o método aproximado para o problema PMC nas unidades de trabalho da área localizada no estado do Acre.

Tabela 12 Comparação dos resultados do método exato e do método aproximado para o problema PMC da área localizada no estado do Acre

UT	NºArv.	V(m ³)	P	Método Exato			Método Aproximado			Eficácia
				Pátios selecionados	T(s)	F.O	Pátios selecionados	T(s)	M.S.	
1	195	1087	2	38; 106	17.96	36275	38; 106	0.5	36271	100,01%
2	433	2205	3	75; 122; 223	87.52	91042	75; 122; 223	1.06	91034	100,01%
3	498	2718	3	28; 103; 179	97.81	104340	28; 103; 179	1.50	104340	99,74%
4	34	170	1	9	1.21	2899	9	0.1	2900	99,97%
5	264	1501	2	28; 109	24.94	57854	28; 109	0.67	57857	99,99%
6	714	4064	5	33; 146; 195; 296; 349	336.55	142595	33; 146; 195; 296; 349	1.73	142597	100,00%
7	55	346	1	49	5.64	8714	49	0.05	8714	100,00%
8	51	265	1	18	3.32	6223	18	0.02	6225	99,97%
9	14	80	1	3	1.18	816	3	0.02	816	100,00%
10	11	71	1	4	1.22	1204	4	0.02	1204	100,00%
11	1093	5787	6	Problema sem solução em tempo computacional			51; 135; 224; 304; 406; 474	2.81	241626	-
12	291	1454	2	26; 123	31.38	73304	26; 123	0.44	73309	99,99%
13	129	736	1	36	25.27	29683	36	0.4	29675	

“Tabela 9, conclusão”

UT	NºArv.	V(m ³)	P	Método Exato			Método Aproximado			Eficácia
				Pátios selecionados	T(s)	F.O	Pátios selecionados	T(s)	M.S.	
14	2299	13534	14	Problema sem solução em tempo computacional			31; 89; 140; 209; 263; 342; 406; 473; 521; 598; 675; 762; 869; 980	5.85	470320	-
15	268	1598	2	31; 102	17.20	49665	31; 102	0.34	49665	100,00%
16	253	1243	2	18; 103	25.99	56392	18; 103	0.61	56392	100,00%

Onde: **UT** – Número da unidade de trabalho da área Acre; **No Arv.** – Número de árvores exploradas na UT; **V(m³)** – volume em m³ a ser explorado na UT; **P** – número de pátios que foram criados nos métodos de otimização; **Método Exato** – são os resultados do método exato *branch and cut*; **Método Aproximado** – resultados da metaheurística híbrida; **Pátios escolhidos** – pátios escolhidos pelos métodos de otimização; **T(s)** – tempo de execução do método em segundos; **F.O.** – valor da função objetivo em metros (m) do método exato; **M.S.** – média das melhores soluções retornadas pelo método aproximado após 100 execuções; **Eficácia** – diferença entre a função objetivo (F.O) do método exato com a melhor solução encontrada (M.S) no método aproximado (porcentagem)

Para esta área de estudo, o método aproximado a eficácia variou de 99 a 100% nas unidades de trabalho. Exceção apenas para as unidades de trabalho 11 e 14 que não obtiveram resultado em tempo computacional para o método exato.

As UTs 4, 7, 8, 9, 10 e 13 possuem um volume de madeira muito baixo, neste caso uma opção seria agregar estas áreas às Áreas de Preservação Permanente ao invés de explorar, isso diminuiria o impacto ambiental.

A Tabela 10 apresenta a comparação entre as distâncias euclidianas mínimas e máximas de arraste das árvores em seus respectivos pátios.

Tabela 13 Comparação entre as distâncias mínimas e máximas de arraste das árvores em seus respectivos pátios resultantes do problema PMC para a área localizada no estado do Acre

Rep	Método Exato				Método Aproximado			
	Dmin	Dmax	> 200 m	> 400 m	Dmin	Dmax	> 200 m	> 400 m
1	3	461	39%	3%	3	461	39	3
2	9	501	53%	3%	3	502	53%	3%
3	9	512	52%	2%	11	549	52%	2%
4	6	187	0%	0%	6	187	0%	0%
5	26	703	52%	8%	26	703	52%	8%
6	27	451	50%	1%	27	451	50%	1%
7	33	373	3%	0%	33	373	3%	0%
8	15	252	6%	0%	15	251	10%	0%
9	2	156	0%	0%	2	156	0%	0%
10	6	258	3%	0%	6	258	3%	0%
11	Problema sem solução em tempo computacional				6	490	11%	1%
12	9	533	64%	12%	8	534	64%	12%
13	1	502	56%	10%	1	502	56%	4%
14	Problema sem solução em tempo computacional				3	602	9%	0%
15	27	421	41%	1%	27	421	41%	1%
16	9	437	61%	2%	9	437	61%	2%

Onde: **UT** – Número da unidade de trabalho da área Acre; **Método Exato** – são os resultados do método exato *branch and cut*; **Método Aproximado** – resultados da metaheurística híbrida; **Dmin**– Distância euclidiana mínima de arraste entre árvores e pátio (m); **Dmax** – Distância euclidiana máxima de arraste entre árvores e pátios (m); **> 200 m** – porcentagem de árvores com distância de arraste até o pátio superior a 200 m; **>400 m** – porcentagem de árvores com distância de arraste até o pátio superior a 400 m.

Para esta área de estudo, a distância de arraste acima de 200 metros é alta para algumas unidades de trabalho, mas em compensação a distância de arraste acima de 400 m tem um valor muito baixo. Este tipo de informação é importante na hora decidir se compensa ou não arrastar a árvore com uma

distância acima de 400 metros. Quanto mais informações o tomador de decisões tiver em mãos mais sábia será sua decisão final.

A Figura 10 apresenta o mapa com a distribuição geográfica dos pátios encontrados pelos métodos de otimização para o problema PMC na unidade de trabalho 3 da área localizada no estado do Acre.

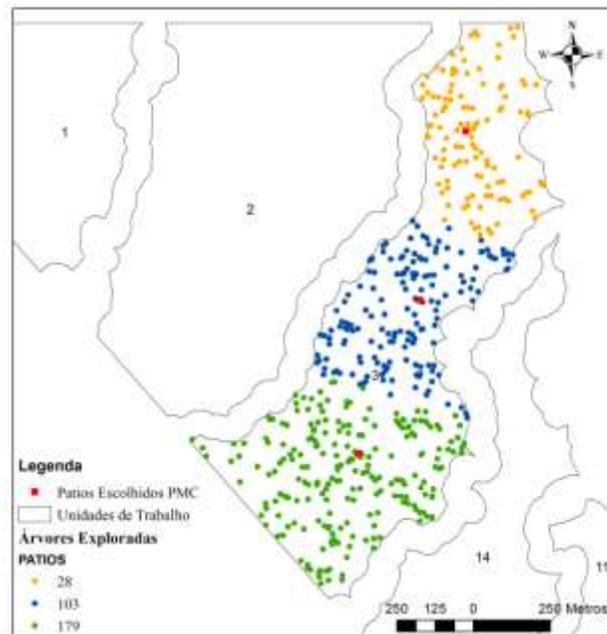


Figura 30 Localização geográfica das árvores e pátios resultantes do problema PMC para a área localizada no estado do Acre

Os dois métodos de otimização apresentaram a mesma distribuição das árvores em seus respectivos pátios para esta unidade de trabalho. Os pontos em vermelho apresentam a localização dos 3 pátios escolhidos (28, 103 e 179). Os pontos laranjas representam as árvores que foram alocadas ao pátio 28, os pontos azuis representam as árvores que foram alocadas ao pátio 103 e os pontos verdes representam as árvores que foram alocadas ao pátio 179.

Através dos resultados apresentados neste trabalho percebe-se que os problemas de localização PM e PMC auxiliam na hora de definir a localização dos melhores locais para construção de pátios de estocagem de madeira. Ficou claro que o uso do método aproximado é muito satisfatório para este tipo de problema, pois retornou resultados próximos do ótimo apresentado pelo método exato com um tempo de execução muito menor.

Resumindo, o método aproximado apresentou bons resultados de eficiência e eficácia se comparado com o método exato para resolução dos problemas PM e PMC nas duas áreas de estudo.

É bom salientar que este é um método para auxiliar no planejamento da locação de pátios e não para substituir os métodos atuais. Deve ser utilizado em conjunto para obter melhores resultados no final.

4 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma nova metodologia que integra geotecnologias com métodos de otimização para localização de pátios de estocagem, auxiliando na exploração de impacto reduzido. É necessário salientar que este é um método embasado cientificamente, deixando de lado a forma empírica e intuitiva como este problema é tratado atualmente nas empresas. Uma combinação das duas abordagens seria muito benéfica para agilizar os procedimentos no planejamento a exploração florestal.

Os resultados encontrados foram semelhantes ao que foi implantado em cada área de estudo, o que mostra a eficácia da metodologia. Entre os métodos de otimização apresentados, o método aproximado (metaheurística) apresentou resultados muito parecidos.

Uma desvantagem desta metodologia é o fato de não apresentar o número de pátios como saída, isso faz com que o planejador tenha que analisar a área primeiro e verificar o número de pátios que deverá ser criado de acordo com o volume de madeira e a capacidade do pátio para depois utilizar o modelo. O ideal seria se o resultado também apresentasse o número ótimo de pátios de acordo com custos.

Este estudo também mostra que a interdisciplinaridade é um excelente caminho para as realizações de estudos e pesquisas, pois interagem diversas formas de se pensar em melhorias para problemas difíceis de serem tratados. Neste caso foi utilizado o Sistema de Informação Geográfica adicionada a Métodos de Otimização como Programação Linear Inteira e Metaheurísticas, visando resolver problemas de planejamento florestal, especificamente nas áreas de Colheita e Transporte Florestal.

4.1 Trabalhos Futuros

Com a experiência obtida no desenvolvimento deste trabalho e com o resultado mostrando que é possível trabalhar com várias ferramentas diferentes para se obter um objetivo em comum é importante salientar que bons trabalhos podem ser realizados nesta mesma linha.

Complementando este trabalho seria interessante o desenvolvimento de um modelo matemático que retornasse não apenas os pátios e a ligação árvore-pátio, mas também o número ótimo de pátios necessário de acordo com o volume a ser explorado da área, seguindo uma restrição de distância máxima de arraste.

Outra possibilidade seria a implementação de uma heurística ou metaheurística para calcular os melhores locais para a construção de estradas.

Outro estudo poderia ser desenvolvido para ramais de arraste. Trabalhar com otimização para diminuir o custo e o impacto nas árvores remanescentes na definição e construção dos ramais de arraste.

Foi percebido durante este trabalho que, para a integração dos domínios científicos dos Sistemas de Informação Geográfica e de diferentes métodos de otimização de maneira simultânea, é fundamental a utilização de diferentes tecnologias do domínio da ciência da computação. Para tal finalidade seria útil criar um sistema (desktop ou web) que integre essas tecnologias de forma transparente para o usuário, de forma que precise apenas escolher as camadas geográficas utilizadas como restrições e o sistema apresentaria como resultado um mapa dos pátios e estradas pronto e otimizado.

REFERÊNCIAS

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

BARCELOS, F. B.; PIZZOLATO, N. D.; LORENA, L. A. N. Localização de escolas do ensino fundamental com modelos capacitados e não-capacitados: Caso de Vitória/ES. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 133-149, jan./abr. 2004.

BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. **Planejamento da extração madeireira dentro de critérios econômicos e ambientais**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2001. 17 p. (Circular Técnica, n. 39).

DÍAZ, J. A.; FERNÁNDEZ, E. Hybrid scatter search and path relinking for the capacitated p-median problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 169, n. 2, p. 570-585, 2006.

DYKSTRA, D. P.; HEINRICH, R. **Código modelo de practicas de aprovechamiento florestal de la FAO**. Roma: FAO, 1996. 85p.

FRANÇA, P. M.; SOSA, N. M.; PUREZA, V. Anadaptive tabu search algorithm for the capacitated p-median problem. **International Transactions in Operational Research**, Oxford, v. 6, n. 6, p. 665-678, Nov. 1999.

GAREY, M. R; JOHNSON, D. S. **Computers and intractability, a guide to the theory of NP-completeness**. 1. ed. : New York: Freeman, 1979.

GHOSEIRI, K.; GHANNADPOUR, S. F. An efficient heuristic method for capacitated P-Median problem. **International Journal of Management Science and Engineering Management**, [S.l.], v. 4, n.1, p.72-80, 2009.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and linkage to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, New York, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986.

GOMIDE, L. R.; MOURA, A. L. M.; MELLO, J. M. Simulação otimizada da exploração florestal de impacto reduzido em uma mata nativa localizada em Lavras, MG. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 20., 2011, Lavras.

GOMIDE, L. R. **Planejamento Florestal Espacial**. 2009. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

KAVEH, P.; ZADEH, A.S.; SAHRAEIAN, R. Solving capacitated p-median problem by hybrid k-means clustering and FNS algorithm. **International Journal of Innovation, Management and Technology**, [S.l.], v. 1, n. 4, p. 405-410, Oct. 2010.

KOSKOSIDIS, Y. A.; POWELL, W. R. Clustering algorithms for consolidation of costumes orders into vehicle shipments. **Transportation Research**, Oxford, v. 26, p. 365-379, 1992.

LORENA, L. A. N.; FURTADO, J. C. Constructive genetic algorithm for clustering problems. **Evolutionary Computation**, Cambridge, v.9, n.3, p. 309-327, Fall, 2001.

MANIEZZO, V.; MINGOZZI, A.; BALDACI, R. A bionomic approach to the capacitated p-median problem. **Journal of Heuristics**, Boston, v.4, n. 3, p. 263-280, Sept. 1998.

MENON, M. U. **Meta-heurísticas na otimização do sortimento florestal**. 2005. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MULVEY, J. M.; BECK M. P. Solving capacitated clustering problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 18, n. 3, p.339-348, 1984.

OSMAN, I. H.; CHRISTOFIDES, N. Capacitated clustering problems by hybrid simulated annealing and tabu search. **International Transactions in Operational Research**, Oxford, v. 1, n. 6, p. 317-336, Oct. 1994.

PILEGGI, G. C. F.; MORABITO, R.; ARENALES, M. N. Abordagens para otimização integrada dos problemas de geração e sequenciamento de padrões de corte: caso unidimensional. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 417-447, 2005.

PIRKUL, H. Efficient algorithms for the capacitated concentrator location problem. **Computers and Operations Research**, New York, v. 14, n. 3, p. 197-208, 1987.

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

RODRIGUES, F. L. et al. Metaheurística simulated annealing para soluções de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 247-256, 2004.

SILVEIRA, R.; MORABITO, R. Um método heurístico baseado em programação dinâmica para o problema de corte bidimensional guilhotinado restrito. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 9, n. 1, p. 78-92, 2002.

ARTIGO 2 Desenvolvimento de um modelo matemático para definição do número ótimo de pátios de estocagem

RESUMO

A operação de extração é uma das atividades que ocasiona mais gastos na atividade de colheita florestal. Exploração de baixo impacto objetiva reduzir os danos ambientais da extração da madeira enquanto aumentam a eficiência das operações. Para redução dos custos das atividades de colheita, várias ferramentas e técnicas podem ser utilizadas, em especial ferramentas como Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento remoto (SR), Sistema de Posicionamento Global (GPS) e técnicas de Pesquisa Operacional (PO), tais como: programação linear, programação inteira e mista, programação dinâmica e utilização de algoritmos. Este trabalho apresenta um novo modelo matemático que auxilia no planejamento de locação de pátios de estocagem, este modelo minimiza o custo da criação dos pátios e minimiza a distância de arraste entre árvore-pátio. Os resultados obtidos foram melhores que os resultados calculados de acordo com o plano de manejo da área estudada. A vantagem do novo modelo é que ele retorna o número ótimo de pátios diferente do PMC, o qual se deve passar esse valor como parâmetro. A conclusão que se chega é que o modelo é eficiente para um número pequeno de variáveis. Quando se trabalha com uma área grande que retorna um número alto de variáveis, ou seja, uma quantidade grande de árvores e possíveis pátios a solução fica inviável.

Palavras-chave: Geotecnologia. Métodos de Otimização. Exploração de Impacto Reduzido.

ABSTRACT

The extraction operation is one of the most expensive activities in forest harvesting. Low impact exploitation aims at reducing the environmental damage caused by timber extraction while increasing operational efficiency. Various tools and techniques may be used to reduce the cost of harvesting activities, tools such as Geographical Information System (GIS), Remote sensing (RS), Global Positioning System (GPS) and Operational Research techniques (OR), such as: linear programming, integer and mixed programming, dynamic programming and the use of algorithms. This paper presents a new mathematical model that assists in storage yard location planning. This model minimizes yard creation costs and the drag distance between tree and yard. The obtained results were better than the results calculated according to the studies field's managing plan. The new model's advantage is that it returns a different optimum number of yards from CPM. This value is considered as a parameter. The reached conclusion is that the model is effective for a small number of variables. When the work is done with a large area which returns a large number of variables, that is, a large amount of trees and possible yards, the solution becomes unviable.

Key-words: Geo-technology. Optimization methods. Reduced Impact Exploitation.

1 INTRODUÇÃO

As atividades da colheita podem ser divididas em três fases básicas: corte processamento, extração e transporte, sendo que, a operação de extração é uma das atividades que ocasiona mais gastos. Quando a colheita é realizada sem planejamento acarreta sérios danos à estrutura da floresta.

Para uma exploração de baixo impacto, isto é, minimizar os danos à regeneração natural e às árvores remanescentes, é obrigatório realizar um levantamento detalhado da área a ser manejada (FREITAS, 2001).

Práticas de Exploração de Impacto Reduzido (EIR) compreendem o planejamento da exploração, desenvolvimento de infraestrutura e técnicas operacionais, as quais objetivam reduzir os danos ambientais da extração da madeira enquanto aumentam a eficiência das operações (BOLTZ; HOLMES; CARTER, 2003).

Em 1999 a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, em conjunto com o Centro Internacional de Pesquisa Florestal – CIFOR, com a Fundação Floresta Tropical - FFT, subsidiária brasileira da Tropical Forest Foundation - TFF e com o Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – IMAZON desenvolveram uma série de diretrizes técnicas para a EIR em florestas de terra firme da Amazônia brasileira (SABOGAL et al., 2000).

Essas diretrizes foram baseadas em experiências já existentes com a exploração de madeira na Amazônia brasileira, consultas feitas a profissionais em exercício neste campo de trabalho, pesquisadores e representantes do governo, e ao Código Modelo da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) para Práticas de Exploração Florestal. As diretrizes consideram o conjunto mínimo de práticas a serem aplicadas nas operações de extração da madeira, e podem ser adaptadas por uma empresa madeireira ao nível de

operações individuais nas fases de pré-exploração, exploração e pós-exploração (POKORNY et al., 2007).

Para redução dos custos das atividades de colheita, várias ferramentas e técnicas podem ser utilizadas, em especial ferramentas como Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento remoto (SR), Sistema de Posicionamento Global (GPS) e técnicas de Pesquisa Operacional (PO), tais como: programação linear, programação inteira e mista, programação dinâmica e utilização de metaheurísticas.

Autores como (SEIXAS, 1986), (ARCE, 1997), (SOARES et al., 2003), (WEINTRAUB; ROMERO, 2006), (FLISBERG; FORSBERG; RÖNNQVIST, 2007), (CONTRERAS; CHUNG, 2007) apresentam em seus estudos métodos de utilização de pesquisa operacional, obtendo bons resultados na otimização do planejamento florestal em diversas atividades como a de arraste de madeira, determinação de rotas ótimas, minimização da distância e custo de transporte, locais ótimos para indústrias, entre outras.

A programação linear (PL) é uma ferramenta da matemática aplicada, sendo que o termo linear implica necessariamente que a Função Objetivo seja linear, bem como as restrições sejam representadas por meio de um sistema de igualdade e desigualdade lineares. PL é um dos métodos mais empregados para resolver problemas de planejamento florestal (JOHNSON; SCHEURMANN, 1997).

Independente do tipo de modelo abordado, a PL apresenta uma eficiência computacional comprovada, e uma versatilidade em formular as restrições ligadas ao manejo das operações florestais (ÖHMAN; ERIKSSON, 2005).

O uso de métodos de otimização vem crescendo a cada dia para auxiliar na colheita florestal. Segundo Lopes e Machado (2003) métodos de otimização têm sido eventualmente usado na exploração de florestas plantadas.

Uma das atividades mais importantes que influencia na mitigação de impactos ambientais e no estabelecimento de operações florestais de alto rendimento no abate e arraste é a localização precisa dos pátios. Quando existe uma combinação de alocação do pátio em relevo favorável e próximo de árvores de grande porte, o rendimento de arraste é bem maior (FIGUEIREDO; LIMA, 2008).

O planejamento da localização dos pátios de estocagem é realizado atualmente de maneira empírica, sem nenhuma otimização. Martinhago (2012) usa o problema de instalações P-Medianas e P-Medianas Capacitado para auxiliar na criação de pátios. O problema é que para se usar o PM e PMC é necessário passar como parâmetro o número de pátios que deverá ser criado na área.

O objetivo com este trabalho foi apresentar um modelo matemático que apresente o número ótimo de pátios de estocagem que devem ser criados em determinada área de exploração nativa reduzindo os custos de construção dos pátios e os custos de arraste árvore-pátio.

Os objetivos específicos foram:

- a) Determinar os melhores locais para construção de pátios de estocagem a partir das restrições geográficas da área de estudo;
- b) Desenvolver um novo modelo matemático que retorne não apenas a localização e ligação árvore-pátio como também o número ótimo de pátios que deverão ser criados na área;
- c) Comparar os resultados do novo modelo com o que foi implantado em campo.

A pergunta científica que será respondida neste artigo é como definir o número ótimo de pátios usando a programação linear inteira?

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e obtenção dos dados

A área de estudo foi a unidade de produção anual (UPA) da Fazenda Canary que está localizada no município de Bujari, região norte do estado do Acre como mostra a Figura 1.

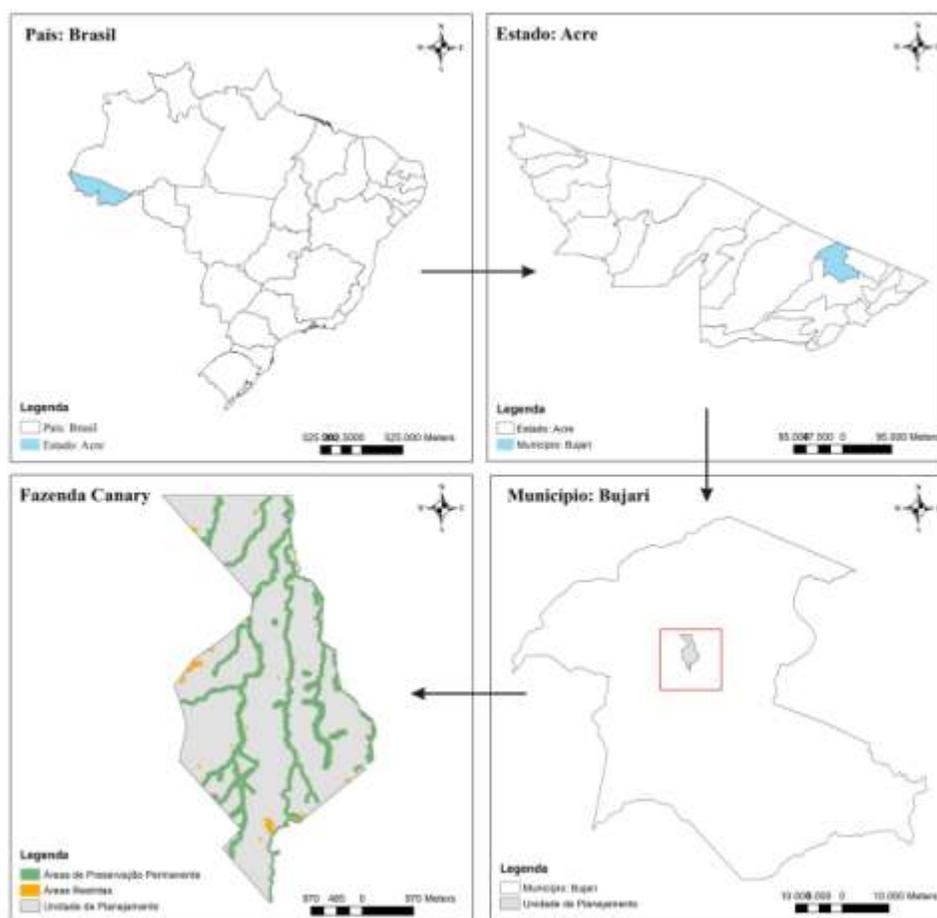


Figura31 Localização da UPA 05 na Fazenda Canary localizada no município de Bujari no estado do Acre

É uma área com aproximadamente 1560 hectares denominada UPA 05 no Plano de Manejo Florestal da Fazenda Canary. O inventário florestal 100% desta área apresentou um total de 23.650 árvores. Dentre estas, 28% são exploráveis, 14% são porta sementes, 31% são para corte futuro, 8% são proibidas de corte/raras, 1% são árvores imunes/segundo ciclo e 18% são árvores em área de preservação permanente (APP). Neste estudo trabalhamos apenas com as árvores exploráveis.

Para melhorar o entendimento da metodologia e resultados desenvolvidos neste trabalho, esta unidade de produção anual foi dividida em 16 repartições. Essa divisão é mostrada na Figura 2.



Figura 32 Divisão da área de estudo em unidades de trabalho

Os dados da área de estudo foram disponibilizados pela Embrapa Acre. O conjunto de dados iniciais foi disponibilizado em formato vetorial compatível com o sistema de informações geográficas utilizado. Esse conjunto refere-se à área e perímetro da UPA, estradas existentes, inventário florestal, curvas de nível, áreas restritas e áreas de preservação permanente.

2.2 Métodos

Os dados foram processados em duas etapas. Na primeira etapa foi realizada a análise geográfica e na segunda etapa foi utilizado o modelo de programação linear inteira desenvolvido.

A análise geográfica foi utilizada para identificar os melhores locais para criação dos pátios de estocagem. Foi desenvolvida em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e seguiram-se as seguintes restrições geográficas:

- a) Inclinação do terreno (obtida a partir das curvas de nível) – os pátios devem ser criados em lugares planos. A restrição utilizada foi que os pátios não podem ser criados em áreas com inclinação acima de 15%. Dependendo da situação este valor pode ser modificado;
- b) Área de Preservação Permanente (APP): Os pátios não devem ser criados dentro de APP;
- c) Áreas Restritas: Os pátios não devem ser criados em áreas restritas. Estas áreas restritas foram definidas anteriormente pela empresa;
- d) Árvores Remanescentes/Raras: Árvores remanescentes (porta sementes) ou raras não podem ser derrubadas para criação de pátios;

- e) Outras restrições geográficas podem ser criadas de acordo com os dados disponíveis da área, como tipo de solo, a localização de árvores com grande volume, localização de árvores remanescentes e protegidas por lei, estradas pré-existentes na propriedade, entre outras restrições. Quanto maior o detalhamento da área, mais completo será o resultado das restrições geográficas.

2.2.1 Modelo matemático

O modelo proposto foi uma extensão do problema das P-Mediana Capacitado (PMC). O PMC consiste em um problema de particionamento de conjunto de n clientes (árvores), onde cada cliente possui um peso (volume), em p agrupamentos disjuntos (pátios), de maneira que a distância total dentro de cada agrupamento seja minimizada e a restrição de capacidade de cada agrupamento (volume do pátio) seja respeitada (ARAKAKI, 2002).

No problema PMC paralocação de pátios de estocagem deve-se passar como parâmetro de entrada o número de instalações que no caso deste trabalho é o número de pátios que devem ser criados. No modelo proposto o número ótimo de pátios foi um resultado do modelo junto com a localização dos pátios e a ligação árvore-pátio para determinada região de acordo com algumas restrições.

Dentro das restrições previstas, a função objetivo buscará minimizar o custo de construção dos pátios e o custo de arraste entre árvore pátio. As restrições básicas foram relacionadas à distância máxima de arraste da árvore até o pátio e o volume máximo de madeira que o pátio comporta.

Cálculos dos custos

Como a função objetivo minimiza os custos da construção dos pátios e o custo de arraste das toras até o pátio (considerando a distância euclidiana – linha reta) foi necessário calcular o valor absoluto médio gasto na construção de um pátio de estocagem e o custo de arraste por metro linear.

Segundo (FIGUEIREDO; LIMA, 2008) em uma floresta densa um trator *Fiatallis*, modelo FD-9 (110 CV), demora aproximadamente 45 minutos, num custo de R\$180,00/hora para criar pátios de estocagem. Utilizando uma regra de três simples, para 45 minutos de trabalho o gasto final é de R\$ 135,00. Sendo assim o custo para construção de pátios considerada neste trabalho foi de R\$135,00 por pátio.

O custo de arraste (floresta densa) utilizado foi R\$0,251 por metro linear de deslocamento na trilha de arraste, considerando a distância euclidiana. Este valor ainda não foi publicado e foi disponibilizado por (E. O. Figueiredo, Comunicação pessoal, 11 de junho de 2012). Este valor apenas considera uma viagem, ou seja, no caso abordado supõem-se que não foi necessário traçar a tora, sem a necessidade de 2 viagens ou mais para cada árvore.

Função Objetivo

A função objetivo (1) deve minimizar o custo de construção dos pátios de estocagem e minimizar a distância de arraste árvore-pátio.

$$FO: \text{Min (R\$)} \sum_{j=1}^N C Y_j + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ está atribuído a instalação } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a instalação } j \text{ esta aberta} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Onde:

i – são as árvores. As árvores foram escolhidas a partir do inventário florestal da área estudada.

j – são os pátios. Os pátios foram resultados da análise geográfica.

C – custo constante de construção de um pátio (R\$);

A – custo constante do arraste por metro linear (R\$);

d_{ij} – distância euclidiana entre a árvore “ i ” e o pátio “ j ” (em metros). A matriz de distância entre as árvores e pátios foi criada a partir de um arquivo gerado pelo SIG contendo as distâncias de todas as árvores para todos os pátios em cada unidade de trabalho da área de estudo.

Restrições

- a) Restrição de rota única (2): esta restrição garante que cada árvore seja destinada a apenas um pátio de estocagem. No modelo proposto foram usadas às árvores do inventário florestal, ou seja, o modelo não precisa selecionar as árvores, por este motivo a igualdade da equação é 1.

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

- b) Restrição de capacidade (3): restrição que garante que o pátio não deverá armazenar mais volume do que a sua capacidade máxima.

$$\sum_i V_i X_{ij} \leq VolPatio \quad \forall j \quad (3)$$

Onde:

V_i é o volume de madeira da árvore “i”. Este valor foi obtido através do inventário florestal.

VolPatio é o volume máximo de madeira que o pátio comporta. Para os testes realizados neste trabalho foi utilizado um volume de 1000 m³, devido ao grande volume de exploração na área de estudo.

- c) Restrição de distância (4). Restrição que garante que a distância máxima de arraste entre a árvore e pátio não será ultrapassada.

$$d_{ij} X_{ij} \leq DistMaxima \quad \forall i, \forall j \quad (4)$$

Onde:

DistMaxima é a distância (euclidiana) máxima a ser considerada entre a árvore “i” e o pátio “j”. O valor utilizado neste trabalho foi de 350 m. Mas este valor pode ser modificado de acordo com a necessidade da área. Braz e Oliveira (2001) sugerem como uma distância de arraste média 150 a 200 metros, podendo atingir um máximo de 400 metros dependendo da situação.

- d) Restrição de ligação (5). Restrição que faz a ligação da árvore ao pátio.

$$X_{ij} - Y_j \leq 0 \quad (5)$$

- e) Restrições binárias (6). Restrições do modelo de programação linear inteira, as variáveis de decisão assumirão os valores 0 ou 1.

$$X_{ij} = \{0; 1\} \forall i; \forall j \quad (6)$$

$$Y_j = \{0; 1\} \forall i; \forall j \quad (6)$$

O processamento do modelo de programação linear inteira foi realizado em um computador Intel® Core™ i3-2310 CPU @ 2.10GHz e 8GB de memória RAM e desenvolvido no Solver IBM ILOG CPLEX 12.4 utilizando o algoritmo *branch and cut*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados da análise geográfica

A Figura 3 apresenta o resultado final da análise geográfica para a unidade de trabalho 3. A Figura mostra em verde as áreas possíveis para o empilhamento de madeira e em cinza as áreas restritas para o empilhamento de madeira.

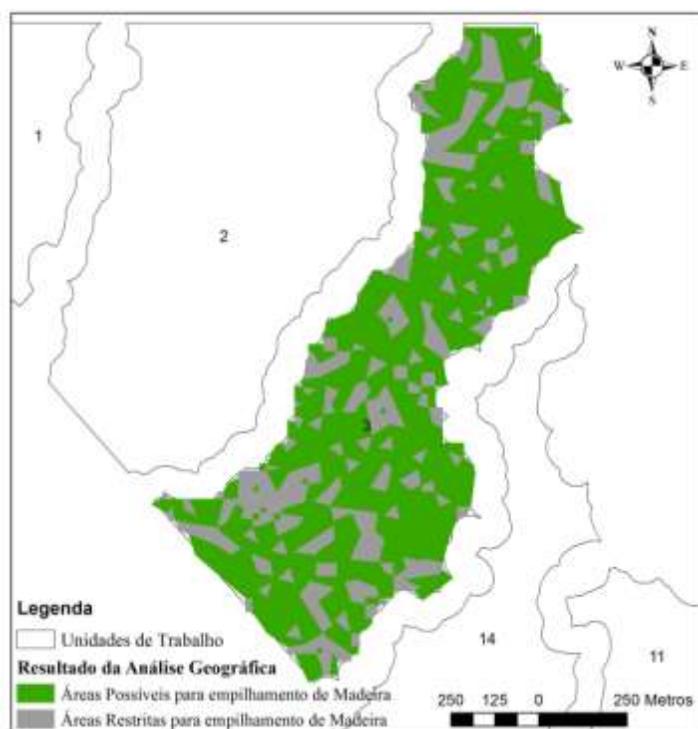


Figura 33 Resultado da análise geográfica com os melhores locais para o empilhamento de madeira da unidade de trabalho 3

A partir do resultado apresentado na Figura 3 foi possível selecionar pontualmente os melhores locais para locação dos pátios de estocagem de madeira que foi utilizado como entrada no novo modelo matemático.

A Figura 4 apresenta a distribuição destes possíveis pátios para a unidade de trabalho³. Os pontos vermelhos apresentam a localização geográfica dos possíveis pontos para locação de pátios de estocagem na área.

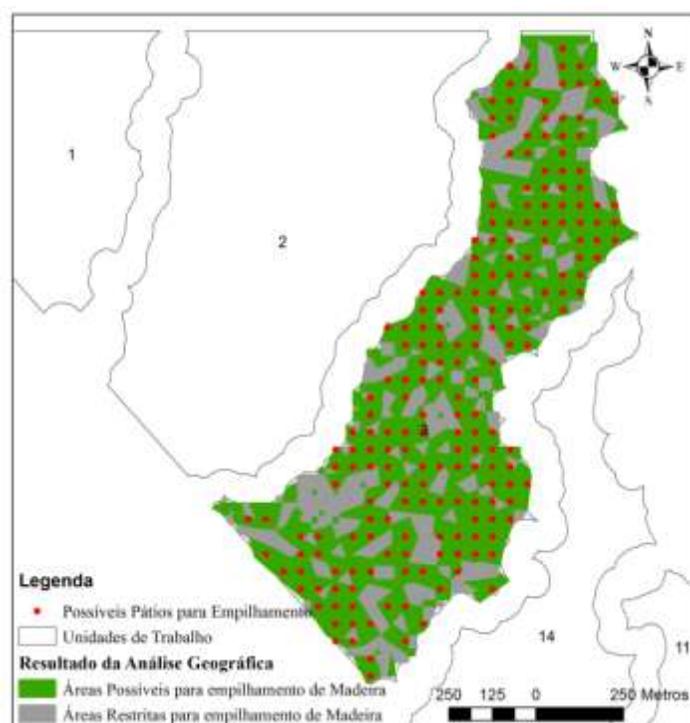


Figura 34 Localização dos possíveis pátios para empilhamento de madeira na unidade de trabalho 3

A Figura 5 apresenta a distribuição das árvores selecionadas para exploração (de acordo com o inventário florestal) que também foram utilizadas

como entrada no modelo matemático em conjunto com a localização dos possíveis pátios de estocagem mostrada na Figura 4.

Neste trabalho foram utilizadas as árvores para exploração do inventário florestal, neste caso não são consideradas as árvores que serão exploradas nos próximos ciclos. Como os pátios de estocagem são infraestruturas permanentes seria interessante considerar também as árvores que serão exploradas nos próximos ciclos para que os pátios sejam criados em pontos ótimos para os vários ciclos.

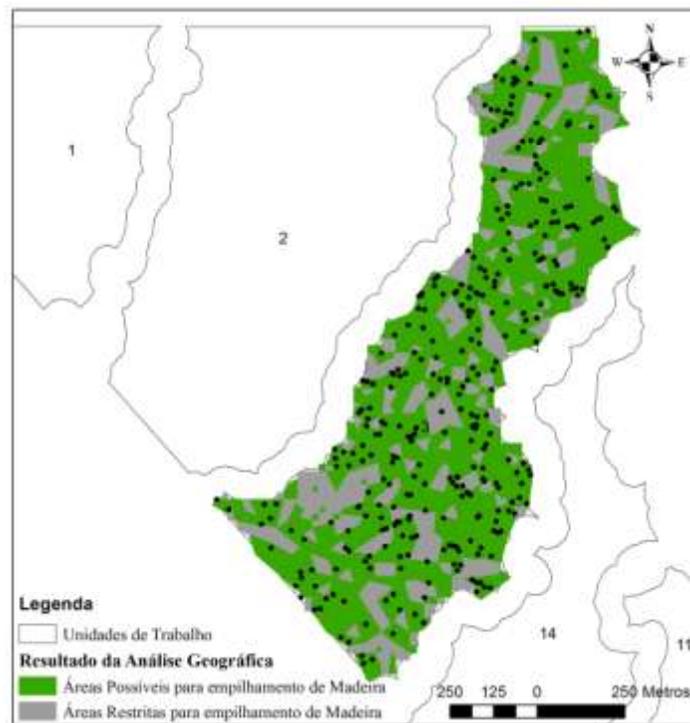


Figura 35 Localização as árvores a serem exploradas na unidade de trabalho 3

3.2 Resultado do modelo matemático

Os métodos exatos de resolução buscam encontrar o ótimo do problema, fato que em problemas de médio e grande porte faz o algoritmo se tornar inviável devido à otimização combinatória e conseqüentemente ao alto tempo de processamento da solução.

Em problemas com um número muito grande de variáveis o algoritmo se torna inutilizável. É o caso da área deste trabalho, pois a UPA estudada possui 6.602 árvores para exploração e 3.469 possíveis pátios, esses valores geram 22.905.807 variáveis de decisão e 22.912.410 restrições, ou seja, é um número que torna este problema intratável através do método exato devido ao tempo computacional.

Por este motivo esta área foi dividida em áreas menores. As divisões foram feitas de acordo com a camada APP, para evitar que uma árvore seja arrastada pela APP para ser alocada em um pátio mais próximo.

A Tabela 1 apresenta o número de variáveis de decisão e de restrições da área de estudo após a unidade de trabalho.

Tabela 14 Número resultante de variáveis e restrições por unidade de trabalho

UT	Arvores	Possíveis Pátios	Variáveis	Restrição
1	195	137	26.852	26.911
2	433	245	106.330	106.519
3	498	203	101.297	101.593
4	34	15	525	545
5	264	174	46.110	46.201
6	714	417	298.155	298.453
7	55	69	3.864	3.851
8	51	43	2.236	2.245
9	14	11	165	169
10	11	11	132	133
11	1093	537	587.478	588.035
12	291	187	54.604	54.709
13	129	83	10.790	10.837
14	2299	1031	2.371.300	2.372.569
15	268	132	35.508	35.645
16	253	174	44.196	44.276

Nos testes iniciais a unidade de trabalho 14 não apresentou resultado em um tempo computacional, devido ao grande número de variáveis de decisão e restrições. Com 2299 árvores e 1031 pátios, por este motivo, a UT 14 foi dividida em 3 partes que foram executadas separadamente.

A Tabela 2 apresenta o resultado do modelo proposto para cada unidade de trabalho da área de estudo.

Tabela 15 Resultado do modelo proposto para as unidades de trabalho da área de estudo

UT	NºArv.	V(m ³)	P	Volume/ Pátio	Pátios selecionados	T(s)
1	195	1087	3	362	36; 62; 115	20,85
2	433	2205	4	551	59; 72; 154; 209	30,93
3	498	2718	5	544	22; 74; 116; 165; 200	27,3
4	34	170	1	170	9	1,34
5	264	1501	4	375	3; 40; 100; 148	17,21
6	714	4064	6	677	34; 89; 195; 217; 327; 386	41,61
7	55	346	1	346	39	6,31
8	51	265	1	265	18	3,52
9	14	80	1	80	3	1,28
10	11	71	1	71	4	2,25
11	1093	5787	9	643	32; 87; 144; 201; 253; 321; 393; 441; 500	270,49
12	291	1454	4	364	16, 57, 126; 161	23,52
13	129	736	2	368	17; 50	10,43
14_1	725	4557	6	760	18; 70; 122; 140; 209; 258	160,06
14_2	769	4554	6	759	46; 63; 134; 177; 259; 266	120,05
14_3	805	4423	8	553	29; 65; 128; 162; 217; 273; 331; 407	177,08
15	268	1598	3	533	22; 62; 107	19,47
16	253	1243	4	311	18; 65; 98; 135	22,47

Onde: **UT** – número da unidade de trabalho; **NºArv** – número de árvores exploradas existentes na UT; **V(m³)** – Volume a ser explorado na UT em m³; **P** – número de pátios selecionados pelo modelo matemático; **Volume/Pátio** – volume médio que será estocado em cada pátio em metros cúbicos (m³). **Pátios escolhidos** – Pátios escolhidos pelo modelo proposto; **T(s)** – tempo de execução do modelo em segundos.

As repartições identificadas por 14_1, 14_2 e 14_3 são as divisões criadas a partir da unidade de trabalho 14.

A Tabela 3 apresenta as distâncias euclidianas mínimas e máximas de arraste entre as árvores e seus respectivos pátios de acordo com o resultado do

modelo proposto apresentado na Tabela 2 para todas as unidades de trabalho da área de estudo.

Tabela 16 Distâncias mínimas e máximas de arraste das árvores para seus respectivos pátios de acordo com o resultado do modelo proposto

UT	Dmin (m)	Dmax (m)	> 200 m (%)
1	21	315	19%
2	9	340	46%
3	2	348	29%
4	6	187	0%
5	16	342	30%
6	5	340	20%
7	33	373	35%
8	15	252	38%
9	2	156	0%
10	6	258	18%
11			
12	10	341	39%
13	3	337	24%
14			
15	10	337	23%
16	9	297	16%

Onde: **UT** – número da unidade de trabalho; **Dmin** – Distância euclidiana mínima de arraste da árvore até seu respectivo pátio; **Dmax** – Distância euclidiana máxima de arraste da árvore até seu respectivo pátio; **> 200 m** – Porcentagem de árvores com distância de arraste maior que 200 metros.

A Figura 6 (a) mostra a localização geográfica dos pátios e suas respectivas árvores do resultado do modelo proposto. Os pontos vermelhos representam a localização dos pátios escolhidos para a unidade de trabalho 3 e os pontos roxos, verdes claro, azuis, laranjas e verde escuro apresentam a localização das árvores que serão arrastadas para os pátios 22, 74, 116, 165 e 200 respectivamente.

A Figura 6 (b) mostra a localização geográfica proposta pelo plano de manejo florestal da área de estudo para mesma unidade de trabalho. Os pontos vermelhos apresentam a localização dos pátios, os pontos em verde escuro apresentam a localização das árvores exploradas e as linhas em amarelo apresentam os ramais de arraste.

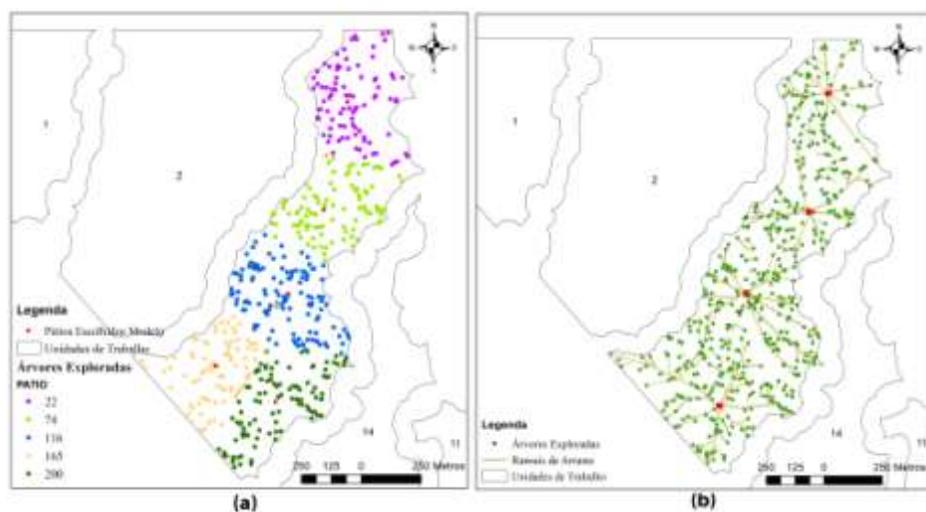


Figura 36 Resultado do novo modelo e o resultado implantado em campo para a unidade de trabalho 3

Para esta unidade de trabalho, o número de pátios criado pelo modelo proposto foi maior que o número utilizado no plano de manejo da área.

A Tabela 4 apresenta a comparação dos custos de arraste e dos custos de criação de pátios resultante do modelo proposto com os custos de arraste e de criação de pátios dos dados proposto pelo plano de manejo da área de estudo.

Para que a comparação, os custos de arraste e de criação de pátios foram criados de forma igual em ambos os cenários (modelo e plano de manejo). Foi calculada a distância euclidiana entre as árvores e seus respectivos pátios, depois esta distância foi multiplicada pelo valor R\$ 0,251 e depois somar todas as

distâncias da unidade de trabalho. Para calcular o custo de criação dos pátios foi multiplicado o número de pátios criados na unidade de trabalho por R\$ 135,00.

Tabela 17 Comparação entre os custos encontrados no modelo e os custos implantados em campo para área de estudo

UT	Resultado modelo			Resultado implantado em campo				Diferença Custo	
	Nº Pátios	Custo Arraste (R\$)	Custo Pátios (R\$)	Custo Total (R\$)	Nº Pátios	Custo Arraste (R\$)	Custo Pátios (R\$)		Custo Total (R\$)
1	3	6.827,16	405,00	7.232,16	3	8.701,00	405,00	9.106,00	1.873,84
2	4	20.110,93	540,00	20.650,93	5	19.836,01	675,00	20.511,01	- 139,92
3	5	20.144,22	675,00	20.819,22	4	22.962,16	540,00	23.502,16	2.682,93
4	1	728,00	135,00	863,00	0	2.791,14	0,00	2.791,14	1.928,14
5	4	10.552,62	540,00	11.092,62	4	11.287,67	540,00	11.827,67	735,05
6	6	31.135,87	810,00	31.945,87	8	30.754,93	1.080,00	31.834,93	- 110,94
7	1	2.187,21	135,00	2.322,21	1	2.427,47	135,00	2.562,47	240,25
8	1	1.561,97	135,00	1.696,97	1	1.596,81	135,00	1.731,81	34,84
9	1	204,82	135,00	339,82	0	1.351,17	0,00	1.351,17	1.011,35
10	1	302,20	135,00	437,20	0	1.073,20	0,00	1.073,20	636,00
11	9	54.598,65	1.215,00	55.813,65	9	56.624,36	1.215,00	57.839,36	2.025,71
12	4	12.545,58	540,00	13.085,58	3	16.749,85	405,00	17.154,85	4.069,27
13	2	4.843,49	270,00	5.113,49	1	7.467,69	135,00	7.602,69	2.489,21
14	20	98.564,87	2.700,00	101.264,87	17	105.548,60	2.295,00	107.843,60	6.578,73
15	3	10.040,33	405,00	10.445,33	3	12.136,93	405,00	12.541,93	2.096,60
16	4	8.857,71	540,00	9.397,71	4	9.602,69	540,00	10.142,69	744,98

Onde: **UT** – é o número da unidade de trabalho; **Nº pátios** – apresenta o número de pátios retornado pelo modelo e implantado em campo; **Custo Arraste** – apresenta o custo de arraste por metro linear em R\$; **Custo Pátios** – apresenta o custo de criação de pátios em R\$; **Custo total** – apresenta a soma do custo de arraste com o custo de construção de pátios em R\$; **Diferença custo** – apresenta a diferença entre o custo total calculado de acordo com o modelo e o custo total calculado de acordo com os dados apresentados no plano de manejo.

Como se pode perceber o custo total encontrado no modelo e o custo apresentado no plano de manejo tiveram variações. O modelo proposto apresentou melhores resultados em quase todas as unidades de trabalho.

Na unidade de trabalho 1, por exemplo, o custo total implantado em campo teve uma diferença de R\$ 1.873,84. Isto aconteceu porque o modelo proposto criou um número maior de pátios ocasionando um custo de arraste maior no resultado calculado de acordo com que foi apresentado pelo plano de manejo.

A Tabela 5 apresenta a relação de distâncias mínimas e máximas de arraste e a porcentagem de árvores com arraste maior de 200 e 400 metros.

Tabela 18 Comparação entre as distâncias euclidianas resultantes do modelo proposto e as distâncias euclidianas calculadas de acordo com o plano de manejo da área de estudo

UT	Modelo Proposto				Plano de Manejo			
	Dmin (m)	Dmax (m)	> 200 m	> 400 m	Dmin (m)	Dmax (m)	> 200 m	> 400 m
1	21	315	19%	0%	7	430	35%	2%
2	9	340	46%	0%	8	463	37%	2%
3	2	348	29%	0%	12	521	40%	2%
4	6	187	0%	0%	164	458	91%	9%
5	16	342	30%	0%	14	716	29%	3%
6	5	340	20%	0%	3	421	36%	1%
7	33	373	35%	0%	26	446	38%	4%
8	15	252	38%	0%	29	260	16%	0%
9	2	156	0%	0%	334	501	100%	21%
10	6	258	18%	0%	305	509	100%	45%
11	5	347	35%	0%	8	500	51%	4%
12	10	341	39%	0%	9	763	52%	11%
13	3	337	24%	0%	15	556	57%	6%
14	3	342	32%	0%	3	560	45%	2%
15	10	337	23%	0%	13	472	37%	1%
16	9	297	16%	0%	9	326	14%	0%

Onde: **UT** – número da unidade de trabalho da área de estudo; **Dmin** – distância euclidiana mínima de arraste entre a árvore e o pátio em metros; **Dmax** – distância euclidiana máxima de arraste entre a árvore e o pátio em metros; **> 200 m** – Porcentagem de árvores que são arrastadas para o pátio com uma distância maior que 200 metros; **> 400 m** – porcentagem de árvores que são arrastadas com uma distância maior que 400 metros.

Na unidade de trabalho 1, por exemplo, tem-se 19% das árvores a uma distância acima de 200 metros para o modelo proposto, enquanto no resultado calculado de acordo com o plano de manejo 35% das árvores possuem esta característica. Este fator explica a diferença entre o custo de arraste dos resultados.

Em quase todas estas repartições o número de pátios criado pelo modelo foi maior ou igual e o custo de arraste foi menor.

É por causa destes questionamentos que o modelo proposto é útil e deve ser usado para auxiliar na tomada de decisão durante o planejamento das locações de pátios de estocagem de madeira e não para substituir totalmente a forma empírica como é feito atualmente.

O custo total da UPA resultante do modelo proposto foi de R\$ 292.520,64 e o custo total calculado de acordo com o plano de manejo florestal foi de R\$ 319.416,69. Uma diferença de R\$ 26.896,04. O número total de pátios criados pelo modelo proposto foi de 69 e o número de pátios apresentados no plano de manejo florestal foi de 63 pátios.

A Figura 6 (a) apresenta a distribuição dos pátios de acordo com o resultado do modelo proposto. Os pontos vermelhos apresentam a localização do centro dos pátios escolhidos na UPA.

A Figura 6 (b) apresenta a distribuição dos pátios de acordo com o plano de manejo. Os pontos vermelhos apresentam a localização dos pátios.

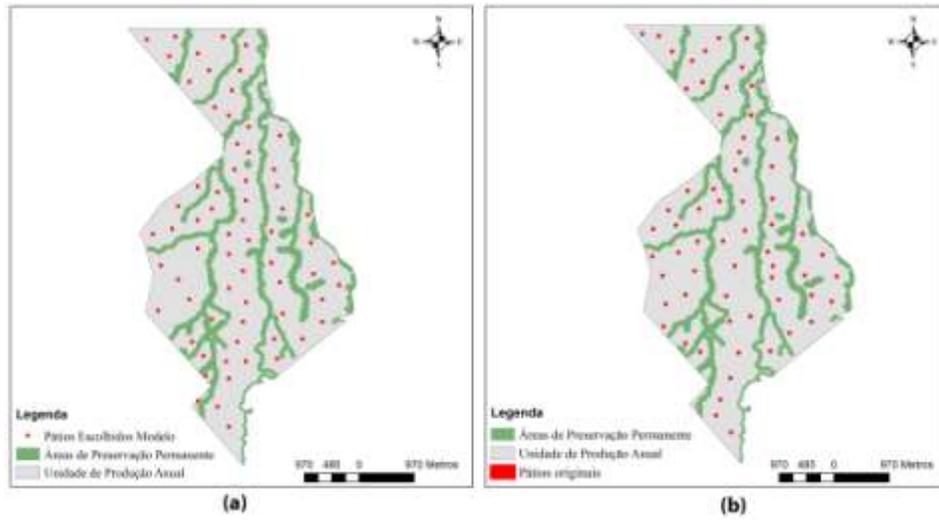


Figura 37 Localização dos pátios retornados pelo modelo (a) e localização dos pátios de acordo com o plano de manejo (b) na área de estudo

4 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou um novo modelo matemático para otimizar o planejamento da locação de pátios de estocagem em áreas de florestas nativas.

A vantagem do novo modelo é que ele retorna o número ótimo de pátios diferente do PMC, o qual se deve passar esse valor como parâmetro.

Os resultados encontrados foram satisfatórios e mostrou que este modelo é útil para auxiliar na tomada de decisão durante o planejamento das locações de pátios de estocagem. Deve ser usado em combinação com a abordagem empírica e intuitiva com é feito atualmente para agilizar e melhorar os resultados, lembrando que não apenas os custos devem ser considerados, mas o impacto ambiental também.

A conclusão que se chega é que o modelo é eficiente para solucionar o problema de locação de pátios e por se tratar de uma extensão do PMC trata-se de um problema de otimização combinatória que dependendo do número de variáveis não existe resultado em tempo computacional.

Uma forma de melhorar isso seria o desenvolvimento de uma heurística ou metaheurística para resolver o problema em um tempo de processamento bem menor e depois usar o modelo em uma aplicação para que usuários finais possam usar de forma mais simples.

REFERÊNCIAS

ARAKAKI, R. G. I. **Heurística de localização-alocação para problemas de localização de instalações**. 2002. 90 p. Tese (Doutorado em computação aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2002.

ARCE, J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando à minimização de custos**. 1997. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BOLTZ, F.; HOLMES P. T.; CARTER, D. R. Economic and environmental impacts of conventional and reduced-impact logging in Tropical South America: a comparative review. **Forest Policy and Economics**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 69-71, 2003.

BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. **Planejamento da extração madeireira dentro de critérios econômicos e ambientais**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2001. 17 p. (Circular Técnica, n. 39).

CONTRERAS, M.; CHUNG, W. A computer approach to finding an optimal log landing location and analyzing influencing factors for ground-based timber harvesting. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.37, n.2, p.276-292, Feb.2007.

FIGUEIREDO, E. O.; LIMA, Q. S. **Coefficientes técnicos para inventário e manejo florestal com emprego do modelo digital de exploração florestal (Modelflora)**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2008. (Comunicado Técnico).

FLISBERG P.; FORSBERG M.; RÖNNQVIST. M. Optimization based planning tools for routing of forwarders at harvest areas. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 37, n. 11, p. 2153-2163, Nov. 2007.

FREITAS, L. J. M. **Inventário de prospecção e otimização da colheita visando a sustentabilidade do manejo de uma floresta estacional semidecidual submontana**. 2001. 129 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objects: discussion and synthesis. **Forest Science**, Lawrence, v.18, n.1, p.1-31, 1997.

LOPES, E. S.; MACHADO, C. C. Desafios do planejamento da colheita florestal no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 6., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa-SIF, 2003. p. 44-68.

MARTINHAGO, A. Z. **Locação ótima de pátios de estocagem para exploração de impacto reduzido na Amazônia brasileira**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L.O. Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 212, n. 1, p. 346-357. 2005.

POKORNY, B. et al. **Monitoramento econômico de operações florestais - MEOF**. Belém: Embrapa, 2007.

SABOGAL, C. et al. **Diretrizes técnicas para a exploração de impacto reduzido em operações florestais de terra firme na Amazônia Brasileira**. Belém: Embrapa, 2000. 57 p. (Documentos, n. 64).

SEIXAS, F. Planejamento e estudo de sistema de exploração florestal. **IPEF**, Piracicaba, n. 34, p.25-303, dez. 1986.

SOARES, C. P. B. et al. Determinação de fatores de empilhamento através de fotografias digitais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.4, p. 473-479, 2003.

WEINTRAUB, A.; ROMERO, C. Operations research models and the management of Agricultural and Forestry Resources: a review and comparison. **Interfaces**, Providence, v. 36, n. 5, p. 446-457, 2006.