



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**MARCELO OTONE AGUIAR**

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO INTEGRADO DE INFRAESTRUTURA NA  
EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA REGIÃO AMAZÔNICA**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES  
DEZEMBRO - 2019

MARCELO OTONE AGUIAR

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO INTEGRADO DE INFRAESTRUTURA NA  
EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.  
Orientador: Dr. Gilson Fernandes da Silva.  
Coorientador: Dr. Geraldo Regis Mauri.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

DEZEMBRO - 2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

O87o Otone Aguiar, Marcelo, 1979-  
Otimização do planejamento integrado de infraestrutura na exploração florestal na região Amazônica / Marcelo Otone Aguiar. 2019.  
193 f. : il.

Orientador: Gilson Fernandes da Silva.  
Coorientador: Geraldo Regis Mauri.  
Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Estradas florestais. 2. Florestas tropicais - Manejo. 3. Florestas - Manejo. 4. Pesquisa operacional. I. Fernandes da Silva, Gilson. II. Regis Mauri, Geraldo. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630\*38

---

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO INTEGRADO DE INFRAESTRUTURA  
NA EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA REGIÃO AMAZÔNICA**

**Marcelo Otone Aguiar**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 05 de dezembro de 2019.

---

**Dr. Cesar Junio de Oliveira Santana** (Examinador externo)  
Remsof

---

**Prof. Dr. Gustavo Eduardo Marcatti** (Examinador externo)  
Universidade Federal de São João del-Rei

---

**Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça** (Examinador interno)  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

**Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri** (Coorientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

**Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva** (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Livia Dalla Barba pelo seu apoio, compreensão, suporte, paciência e ajuda.

Aos meus pais, Aduino Carvalho de Aguiar e Ivanildes Otoni Aguiar, por terem se orgulhado e acreditado em mim, por sempre me darem o seu apoio, seus ensinamentos, pelo exemplo e pelo suporte que foi fundamental em minha vida.

Aos meus filhos por serem parte da minha motivação diária.

Ao meu orientador Gilson Fernandes pelo imprescindível suporte na área florestal, pela paciência e principalmente pela sua preocupação com os meus resultados.

Ao meu coorientador Geraldo Regis Mauri pelos ensinamentos, pela constante ajuda e disponibilidade.

A Universidade Federal do Espírito Santo, principalmente, a equipe do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais pelo acolhimento.

Aos colegas de Laboratório pela convivência, pelo suporte e ajuda. Em especial ao colega Evandro Ferreira da Silva que me ensinou muito sobre florestas nativas e se disponibilizou sempre que eu precisei.

Ao meu colega de trabalho Rodrigo Freitas que me deu apoio e se tornou o meu parceiro de pesquisa.

Aos que, por acaso, eu não tenha mencionado, mas que acreditaram ou me ajudaram direta ou indiretamente, eu agradeço.

## RESUMO

AGUIAR, Marcelo Otone, **Otimização do planejamento integrado de infraestrutura na exploração florestal na região Amazônica**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo. Orientador: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva. Coorientador: Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri.

O Manejo Florestal Sustentável (MFS) tem um papel fundamental na manutenção da floresta remanescente. Iniciativas tem se apoiado em novas tecnologias para um planejamento da exploração com o objetivo de minimizar os impactos ambientais e reduzir os custos de operação. Nesse contexto, esta pesquisa investiga métodos de otimização com o objetivo de propor uma metodologia para auxiliar o gestor no planejamento da alocação das infraestruturas necessárias à exploração em florestas nativas na Amazônia, minimizando danos ambientais e maximizando o uso dos recursos. Este estudo foi dividido em três capítulos principais. O primeiro envolve a avaliação de métodos de otimização para a alocação de pátios de estocagem. O segundo capítulo teve como objetivo avaliar métodos para o planejamento de estradas florestais. E, por fim, o terceiro capítulo investiga duas metodologias para a alocação integrada de estradas florestais, pátios de estocagem e trilhas de arraste. A área de estudo foi a Floresta Nacional (FLONA) Saracá-Taquera, localizada nos municípios de Faro, Oriximiná e Terra Santa, Unidade de Manejo Florestal (UMF-1A), Unidade de Produção Anual de 2018 (UPA/2018). Os resultados do primeiro capítulo indicam que, dentre os métodos avaliados, a meta-heurística *Simulated Annealing* foi a mais eficiente para a alocação dos pátios de estocagem. No segundo capítulo, os experimentos reportados evidenciam que o algoritmo Dijkstra foi o mais eficaz e eficiente para o traçado de estradas, tendo em vista que o mesmo foi capaz de obter soluções ótimas em tempo inferior aos demais métodos avaliados para as três instâncias consideradas. Os resultados do terceiro capítulo indicam que avaliar diferentes quantitativos na alocação de pátios de estocagem pode favorecer a tomada de decisão, tendo em vista que os pátios influem diretamente na alocação ótima de estradas florestais e trilhas de arraste. Ademais, pode-se concluir que o planejamento integrado permite escolher a melhor solução global do plano, que se baseia na alocação do conjunto de infraestruturas.

**Palavras chave:** Heurísticas, Manejo Florestal de Precisão, Otimização florestal.

## ABSTRACT

AGUIAR, Marcelo Otone, **Optimization of integrated forestry planning infrastructure in the Amazon region**. 2019. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Dr. Gilson Fernandes da Silva. Co-advisor: Dr. Geraldo Regis Mauri.

Sustainable Forest Management (MFS) has a key role in maintaining the remaining forest. Initiatives have been relied on new technologies for planning exploration to minimize environmental impacts and reduce operating costs. In this context, this research investigates optimization methods in order to propose a methodology to assist the manager in planning the allocation of infrastructures necessary for exploitation in native forests in the Amazon, minimizing environmental damage and maximizing the use of resources. This study was divided into three main sections. The first involves the evaluation of optimization methods for allocating storage yards. The second chapter was to evaluate methods for design forest roads. And finally, the third chapter investigates two methodologies for integrated allocation of forest roads, storage yards and skid trails. The study area was the Saracá-Taquera National Forest (FLONA), located in the city of Faro, Oriximiná and Terra Santa, Forest Management Unit (UMF-1A), 2018 Annual Production Unit (UPA / 2018). The results of the first chapter indicate that, among the evaluated methods, the Simulated Annealing was the most efficient for the storage yard allocation. In the second chapter, the reported experiments show that the Dijkstra algorithm was the most effective and efficient for the road layout, considering that it was able to obtain optimal solutions in faster time than the other methods evaluated for the three considered instances. The results of third chapter indicate that evaluating different quantities in allocation of store yards may favor decision making, since yards directly influence optimal allocation forest roads and trails. In addition, it can be concluded that integrated planning allows choosing best overall plan solution, which is based on allocation of infrastructure set.

**Keywords:** Heuristics, Precision Forest Management, Forest Optimization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação esquemática das etapas do manejo florestal .....	22
Figura 2. Divisão da UPA em UTs para a execução do manejo florestal .....	26
Figura 3. Exemplo de delimitação de parcelas permanentes .....	28
Figura 4. Elementos espaciais em planta e em perfil .....	35
Figura 5. Tipos de curvas em perfil horizontal.....	36
Figura 6. Geometria de uma curva vertical .....	40
Figura 7. Distância de visibilidade de parada maior que o comprimento da curva....	41
Figura 8. Tipos de corte de estrada.....	42
Figura 9. Típicas declividades transversais aplicadas em pista para o escoamento.	44
Figura 10. Concordâncias verticais convexas em trechos em corte.....	45
Figura 11. Exemplo de ligação entre estrada secundária, pátio e trilhas de arraste .	47
Figura 12. Termos utilizados no relevo .....	50
Figura 13. Sistema de traçado para encostas .....	51
Figura 14. Esquema teórico da separação ótima de estradas .....	60
Figura 15. Binômio Investimento em Estrada x Transporte Florestal .....	62
Figura 16. Exemplo de estradas secundárias e suas ramificações.....	67
Figura 17. Exemplo de desvio ao longo da estrada .....	69
Figura 18. Fluxo de escoamento da matéria-prima .....	70
Figura 19. Planejamento da ligação de trilhas principais e secundárias .....	71
Figura 20. Exemplo de distribuição de pátios de estocagem .....	72
Figura 21. Exemplo de grafo com vários caminhos.....	78
Figura 22. Exemplo de caminhos selecionados para o grafo apresentado na Figura 21 .....	79
Figura 23. Fluxograma metodológico de processamento dos métodos de solução para o problema de alocação de pátios de estocagem.....	93
Figura 24. Área de estudo .....	94
Figura 25. Pseudocódigo da HCA.....	97
Figura 26. Ilustração da busca local.....	98
Figura 27. Ilustração da obtenção de solução vizinha para o problema de alocação de pátios.....	99
Figura 28. Pseudocódigo do GRASP aplicado à alocação de pátios de estocagem .....	101
Figura 29. Pseudocódigo da TS aplicado ao problema de alocação de pátios de estocagem.....	102
Figura 30. Pseudocódigo da VNS aplicado à alocação de pátios de estocagem....	104
Figura 31. Pseudocódigo do SA aplicado ao problema de alocação de pátios.....	105
Figura 32. Fluxograma metodológico de processamento dos métodos de solução para o problema de traçado de estradas florestais .....	122
Figura 33. Área de estudo utilizada para o problema do traçado de estradas florestais .....	123
Figura 34. Pseudocódigo do pré-processamento de determinação do traçado de estradas .....	125
Figura 35. Pseudocódigo do algoritmo de Dijkstra .....	129

Figura 36. Pseudocódigo da heurística responsável por gerar uma solução inicial de estradas .....	131
Figura 37. Etapas da geração de uma solução vizinha para o problema do traçado de estradas.....	132
Figura 38. Pseudocódigo da VNS aplicado à determinação do traçado de estradas florestais.....	133
Figura 39. Pseudocódigo do SA.....	134
Figura 40. Estratégia para o desvio de obstáculos em traçado de estrada florestal aplicada na UT-3.....	138
Figura 41. Estratégia para o desvio de APP em traçado de estrada florestal aplicada na UT-5 .....	139
Figura 42. Estratégia para desviar de áreas suscetíveis ao acúmulo de água aplicada na UT-3.....	140
Figura 43. Estratégia para desviar de áreas com inclinação acima do recomendado aplicada na UT-3.....	141
Figura 44. Comparação do traçado obtido pelo Dijkstra com o planejamento da Empresa para as três instâncias .....	143
Figura 45. Presença de árvores remanescentes nas imediações do término do traçado da Instância 3 .....	145
Figura 46. Fluxograma metodológico da integração do planejamento das infraestruturas de exploração florestal .....	155
Figura 47. Área de estudo.....	156
Figura 48. Pseudocódigo do pré-processamento de alocação de infraestruturas...	157
Figura 49. Estratégias adotadas para a determinação das infraestruturas de forma integrada .....	159
Figura 50. Heurística de ligação de estradas secundárias (HLES) .....	160
Figura 51. Heurística de ligação de pátios de estocagem (HLP).....	162
Figura 52. Exemplo de recorte da área de um pátio de estocagem.....	164
Figura 53. Pseudocódigo da heurística para definição do traçado de trilhas de arraste (HTTA) .....	165
Figura 54. Melhor solução obtida para a Instância 3 na estratégia A e primeiro cenário .....	172
Figura 55. Desvios da melhor solução obtida para a Instância 3 na estratégia A e primeiro cenário.....	174
Figura 56. Melhor solução obtida para a Instância 3 na estratégia B e primeiro cenário .....	180
Figura 57. Desvios da melhor solução obtida para a Instância 3 na estratégia B e primeiro cenário.....	182

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de processamento da alocação de pátios de estocagem para 3 instâncias .....	107
Tabela 2. Parâmetros de entrada do GRASP para o problema de alocação de pátios de estocagem.....	107
Tabela 3. Parâmetros de entrada da TS para o problema de alocação de pátios de estocagem.....	108
Tabela 4. Parâmetros de entrada para o VNS para o problema de alocação de pátios de estocagem.....	108
Tabela 5. Parâmetros de entrada do SA para o problema de alocação de pátios de estocagem.....	108
Tabela 6. Resultados computacionais para a alocação de pátios de estocagem ...	110
Tabela 7. Resumo de soluções viáveis para as instâncias .....	110
Tabela 8. Resumo das instâncias formadas a partir das unidades de trabalho para o problema de alocação de estradas florestais .....	124
Tabela 9. Pontos de início e término adotados no planejamento de estradas primárias conforme planejamento realizado pela empresa EBATA .....	125
Tabela 10. Parâmetros de penalização para o problema de traçado de estradas florestais.....	136
Tabela 11. Parâmetros de entrada para o VNS para o problema de traçado de estradas florestais .....	136
Tabela 12. Parâmetros de entrada do SA para o problema de traçado de estradas florestais.....	136
Tabela 13. Resultados computacionais para o traçado de estradas .....	141
Tabela 14. Pontos de início e término adotados no planejamento de estradas primárias conforme planejamento realizado pela empresa EBATA .....	158
Tabela 15. Parâmetros de entrada do SA para o problema de localização dos melhores pontos para o traçado das trilhas de arraste primárias.....	166
Tabela 16. Parâmetros adotados para análise de cenários na alocação de infraestruturas para exploração em floresta nativa.....	166
Tabela 17. Resumo da extensão e densidade de estradas e trilhas da Estratégia A .....	169
Tabela 18. Impacto das infraestruturas em hectares de área aberta para a implantação de infraestruturas na estratégia A .....	170
Tabela 19. Impacto das infraestruturas em percentual de área de efetiva exploração para a implantação de infraestruturas na estratégia A.....	170
Tabela 20. Custo de construção das infraestruturas de exploração para a estratégia A.....	171
Tabela 21. Resultados obtidos para o traçado de estradas primárias da e estratégia A.....	175
Tabela 22. Resultados computacionais para a alocação de pátios de estocagem em três cenários.....	176
Tabela 23. Resultados computacionais para estradas secundárias da estratégia A .....	176

Tabela 24. Resultados computacionais para o traçado de trilhas de arraste da estratégia A .....	177
Tabela 25. Resumo da extensão e densidade de estradas e trilhas da Estratégia B .....	177
Tabela 26. Impacto das infraestruturas em hectares de área aberta para a implantação de infraestruturas na estratégia B .....	178
Tabela 27. Impacto das infraestruturas em percentual de área de efetiva exploração para a implantação de infraestruturas na estratégia B .....	178
Tabela 28. Custo de construção das infraestruturas de exploração para a estratégia B .....	179
Tabela 29. Resultados computacionais para estradas primárias da estratégia B ...	183
Tabela 30. Resultados computacionais para estradas secundárias da estratégia B .....	183
Tabela 31. Resultados computacionais para o traçado de trilhas de arraste da estratégia B .....	184
Tabela 32. Comparação entre os planejamentos propostos .....	184

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Valores de referência para DVP .....	37
Quadro 2. Valores de referência de coeficientes de atrito lateral .....	38
Quadro 3. Valores dos raios mínimos em função das taxas de superelevação .....	39
Quadro 4. Recomendação de valores máximos para Greide.....	39
Quadro 5. Raios que dispensam a superelevação.....	44
Quadro 6. Características comumente adotadas para estradas florestais .....	52
Quadro 7. Raio mínimo considerando várias velocidades .....	52
Quadro 8. Valores máximos admissíveis de coeficientes de atrito lateral em estradas rurais .....	53
Quadro 9. Greide máximo para caminhões em diferentes velocidades e topografias .....	53
Quadro 10. Níveis de permeabilidade do solo.....	55
Quadro 11. Frequência mínima de dreno para estradas e trilhas de arraste .....	55
Quadro 12. Tamanho de pátios em função do modelo de transporte e tamanho do caminhão.....	73
Quadro 13. Principais práticas indicadas para adoção no planejamento de infraestruturas: EIR ou lei? .....	73
Quadro 14. Valores de gradiente e largura adotados para estradas florestais.....	126

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- APP – Área de preservação permanente
- ART – Anotação de responsabilidade técnica
- CAP - Circunferência a altura do peito
- CMP - Custo médio de produção
- CNFP - Cadastro Nacional de Florestas Públicas
- DAP – Diâmetro a altura do peito
- DE – Densidade de estrada
- DMC - diâmetro mínimo de corte
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DOE – Densidade ótima de estradas
- DVP – distância de visibilidade de parada
- EIR – Exploração de impacto reduzido
- FLONA – Floresta Nacional
- FNDF – Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal
- FO – Função Objetivo
- GNSS - *Global Navigation Satellite System*
- GRASP - *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*
- HCA - Heurística Construtiva Aleatória
- HCG – Heurística Construtiva Gulosa
- HLES - Heurística de ligação de Estradas Secundárias
- HLP - Heurística de Ligação de Pátios
- HTTA - Heurística para Definição do Traçado de Trilhas de Arraste
- LGFP – Gestão de Florestas Públicas
- LRC - Lista Restrita de Candidatos
- MDE - Modelo digital de elevação
- MF – Manejo florestal
- MFS – Manejo florestal sustentável
- MODEFLORA – Modelo Digital de Exploração Florestal
- PCM - Problema de caminho mínimo
- PCMC - Problema de caminho mais curto
- PLIB - Programação linear inteira binária
- PMFS – Plano de manejo florestal sustentável
- PO – Pesquisa operacional

POA – Plano operacional anual

SA - *Simulated Annealing*

SFB – Serviço Florestal Brasileiro

SIG – Sistema de informações geográficas

SOE - Separação ótima entre estradas

SRTM - Acrônimo em inglês para Missão Topográfica Radar Shuttle

TIR - Taxa interna de retorno

TRC - Tempo de retorno do capital

TS - *Tabu Search*

UMF – Unidade de manejo florestal

UPA – Unidade de produção anual

UT – Unidade de Trabalho

$V_D$  – Velocidade diretriz

VET - Valor esperado da terra

VNS - *Variable Neighborhood Search*

VPL - Valor presente líquido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>17</b>
1.1	HIPÓTESE.....	18
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
1.3	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA.....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
2.1	MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA.....	20
2.1.1	Macroplanejamento.....	22
2.1.2	Microplanejamento.....	25
2.1.3	Atividades exploratórias.....	29
2.1.4	Atividades pós-exploratórias.....	29
2.1.5	Cenário atual do manejo florestal na Amazônia.....	30
2.2	ESTRADAS.....	31
2.2.1	Planejamento de estradas.....	32
2.2.2	Aspectos Técnicos de estradas.....	33
2.3	ESTRADAS FLORESTAIS.....	45
2.4	PLANEJAMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS.....	47
2.4.1	Fases do planejamento.....	48
2.4.2	Métodos de planejamento.....	48
2.4.3	Aspectos técnicos.....	49
2.4.4	Aspectos econômicos.....	56
2.4.5	Aspectos ambientais.....	63
2.4.6	Aspectos sociais.....	65
2.4.7	Técnicas de planejamento de estradas florestais na Amazônia.....	66
2.5	Métodos de Otimização.....	75
2.5.1	Abordagens para a otimização.....	75
2.5.2	O problema do caminho mais curto (PCMC).....	77
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>80</b>
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO 1 – ALOCAÇÃO ÓTIMA DE PÁTIOS DE ESTOCAGEM EM ÁREA DE MFS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA</b> .....	<b>89</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	91
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	92
4.2.1	Etapa 1 do fluxograma: Formação da base de dados.....	93

4.2.2	Etapa 2 do fluxograma: Modelo de otimização e meta-heurísticas	95
4.2.3	Etapa 3 do fluxograma: Calibração dos parâmetros	106
4.2.4	Etapa 4 do fluxograma: Análise e resultados	108
4.3	RESULTADOS	109
4.4	DISCUSSÃO	111
4.5	CONCLUSÃO	113
4.6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	114
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO 2 - DEFINIÇÃO ÓTIMA DO TRAÇADO DE ESTRADAS FLORESTAIS EM ÁREA DE MFS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA</b>	<b>118</b>
5.1	INTRODUÇÃO	120
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	121
5.2.1	Etapa 1 do fluxograma: Formação da base de dados	122
5.2.2	Etapa 2 do fluxograma: Definição das restrições	126
5.2.3	Etapa 3 do fluxograma: Modelo de otimização e meta-heurísticas	127
5.2.4	Etapa 4 do fluxograma: Calibração dos parâmetros	135
5.2.5	Etapa 5 do fluxograma: Análise e resultados	137
5.3	RESULTADOS	137
5.3.1	Análise das variáveis declividade, áreas suscetíveis ao acúmulo de água, árvores remanescentes, nascentes e APP	137
5.3.2	Resultados computacionais para o traçado de estradas	141
5.4	DISCUSSÃO	144
5.5	CONCLUSÃO	145
5.6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	147
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO 3 - PLANEJAMENTO INTEGRADO DAS INFRAESTRUTURAS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM MFS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA</b>	<b>151</b>
6.1	INTRODUÇÃO	153
6.2	MATERIAL E MÉTODOS	154
6.2.1	Etapa 1 do fluxograma: Formação da base de dados	155
6.2.2	Etapa 2 do fluxograma: Estratégias de integração	159
6.2.3	Etapa 3 do fluxograma: Calibração dos parâmetros	165
6.2.4	Etapa 4 do fluxograma: Análise e resultados	166
6.3	RESULTADOS	168
6.3.1	Resultados obtidos para a estratégia A	168
6.3.2	Resultados obtidos para a estratégia B	177

<b>6.3.3</b>	<b>Comparativo entre os planejamentos.....</b>	<b>184</b>
6.4	DISCUSSÃO .....	185
6.5	CONCLUSÃO .....	187
6.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	189
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>192</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil possui cerca de 312 milhões de hectares de floresta públicas, conforme o Cadastro Nacional de Florestas Públicas (CNFP). Desta base de dados é realizada a seleção de áreas para a concessão florestal, que tem crescido a cada ano (BRASIL, 2017). O Manejo Florestal Sustentável (MFS) tem sido reconhecido como a técnica mais adequada para a exploração destas áreas em função dos benefícios obtidos para a manutenção da floresta remanescente (BRAZ et al., 1998; REIS et al., 2013; SABOGAL et al., 2006).

O MFS é definido como o conjunto de procedimentos que viabilizam a utilização dos recursos florestais madeireiros e não madeireiros (HOSOKAWA; MOURA; CUNHA, 1998; ROTTA; MICOL; SANTOS, 2006) resultando em benefícios sociais, econômicos e ambientais (TIMOFEICZYK JÚNIOR et al., 2005). E dessa forma, propiciando a redução de resíduos, aumento de produtividade, menor impacto à floresta remanescente, além de assegurar maior segurança de trabalho (AMARAL et al., 1998).

Apesar da necessidade da aplicação do MFS, ainda persistem grandes lacunas no planejamento da exploração, em sua maioria, devido à heterogeneidade das florestas tropicais. Características como: o padrão de distribuição de suas espécies, a tipologia florestal, solo, relevo e a hidrografia, tornam a modelagem do ecossistema extremamente complexa, o que resulta em uma tarefa árdua, o planejamento da exploração com operações mais precisas (BRAZ, 2005; EPSTEIN et al., 2006; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

Atualmente, o método utilizado no projeto de infraestruturas florestais é denominado de sistemático. Nesse modelo desconsidera-se a heterogeneidade da floresta nativa (BRAZ, 2005). Com isso, há recorrentes alterações no planejamento quando se verifica em campo a inviabilidade de aplicação, aumentando os custos e o tempo de trabalho. Além disso, os fatores ambientais e os operacionais contribuem para diferenças entre a produção planejada e a executada (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007). Dessa forma, o planejamento sistemático tem contribuído em sua maioria, exclusivamente no momento da formalização e obtenção de licenças.

O uso de tecnologias que consideram informações espaciais, de recursos disponíveis e de características das operações, tem gradativamente ganhado espaço no apoio do planejamento da exploração de florestas nativas (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; MACHADO, 2014). Contudo, ainda é comum que o

planejamento dessas infraestruturas com o uso de tecnologias seja realizado de forma intuitiva (PHILIPPART et al., 2012; SILVA et al., 2018a) com o auxílio de informações de sistema de informação geográfica (SIG) (BASKENT; KELES, 2005; LIU; SESSIONS, 1993; NEWNHAM, 1995).

Esse processo intuitivo está ligado à experiência do tomador de decisão, que demanda mais tempo para alocar a infraestrutura do que analisar a viabilidade do planejamento (SILVA et al., 2018a). Porém, a exploração é considerada uma das etapas mais importantes do MFS e, dessa forma, requer um plano que vá além do empirismo, que possibilite maximizar os retornos e favoreça a eficiência operacional e ambiental.

O cenário atual e o potencial de uso tecnológico na otimização florestal foram o gatilho motivador deste estudo, cujo objetivo é contribuir com o manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira, no aperfeiçoamento do planejamento da exploração aplicada à floresta nativa.

## 1.1 HIPÓTESE

Neste estudo, formulou-se uma hipótese acerca da exploração autorizada na Amazônia legal, relacionada ao planejamento das infraestruturas necessárias à exploração.

A hipótese é:

1. O atual modelo de planejamento sistemático pode ser substituído por um modelo eficaz no planejamento otimizado da alocação de infraestruturas de exploração florestal com vistas à otimização dos recursos, minimizando os danos ambientais.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi propor um modelo de planejamento das infraestruturas florestais para exploração em florestas nativas da Amazônia, combinando informações técnicas da área a ser explorada, provenientes de dados de campo e métodos computacionais, visando a otimização do uso dos recursos e a promoção de práticas no planejamento que visam a manutenção da floresta remanescente.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar métodos computacionais para a aplicação no planejamento de infraestruturas necessárias à exploração em MFS;
- Combinar os métodos avaliados em um modelo para o planejamento das infraestruturas;
- Avaliar a qualidade das soluções produzidas pelos métodos.

### 1.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA

- Desenvolveu-se duas estratégias de alocação das infraestruturas necessárias para a exploração no MFS;
- Obteve-se evidências da influência direta do quantitativo de pátios de estocagem na otimização do traçado de estradas florestais e trilhas de arraste;
- Obteve-se evidências dos benefícios da avaliação de vários cenários ao planejar a alocação das infraestruturas florestais; e por fim,
- Obteve-se evidências das vantagens na tomada de decisão ao realizar o planejamento das infraestruturas de forma integrada.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

De acordo com dados da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2015), o Brasil possui 493,5 milhões de hectares cobertos por floresta, sendo que deste total, 98% são de florestas nativas (485,7 milhões de hectares). O Brasil é o segundo maior produtor mundial de madeira tropical e a principal fonte dessa madeira é a floresta amazônica (SFB, 2011). Considerando a madeira em tora, a Amazônia é a região responsável por 75% da produção no Brasil. Um levantamento feito por Zerbini (2014) aponta que em 2012 a exploração certificada em florestas nativas foi responsável pela produção de aproximadamente 340 mil m<sup>3</sup> em quase 1,4 milhão de hectares.

Naturalmente, a manutenção desse status depende da floresta em pé e, neste aspecto, o manejo de florestas nativas é fundamental (AMARAL et al., 1998; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007). Dentre as atividades de exploração madeireira, a construção de estradas florestais está entre as que causam maior impacto ambiental, gerando áreas degradadas por corte de árvores, aterro, abertura de áreas, entre outras (HOLMES et al., 2002; PORTUGAL; MACHADO; SILVA, 2013; SILVA et al., 2018a). Dessa forma, o manejo de florestas nativas exerce um papel importante no planejamento da construção e manutenção de estradas florestais com vista à diminuição dos impactos por elas causados.

### 2.1 MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA

No Brasil, a legislação no setor florestal avançou muito, desde 1934, ano que foi estabelecido o primeiro decreto com regras para este setor. Em 1965 o primeiro Código Florestal Brasileiro (Lei 4.771/65) passou a vigorar. Em 2002 ocorreu um importante avanço, com uma instrução normativa publicada pelo Ministério do Meio Ambiente que determinava procedimentos para atividades de manejo florestal sustentável na Amazônia (BRASIL, 1965, 2002).

No que diz respeito às florestas públicas, havia o interesse em minimizar o uso predatório dos recursos naturais, o desmatamento e a apropriação ilegal por particulares. Assim, o Governo Federal instituiu o controle às florestas públicas em 2006, por meio da Lei de Gestão de Florestas Públicas, que trata do uso e gestão das florestas públicas brasileiras de forma sustentável. A publicação da LGFP levou a criação do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) e do Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal (FNDF) (BRASIL, 2006a; ESPADA et al., 2016). Em

2012, foi estabelecido o novo Código Florestal Brasileiro por meio da Lei 12.651/12 (BRASIL, 2012), que trouxe significativos avanços em relação ao código anterior.

Apesar da exigência da aplicação do manejo florestal na Amazônia, ainda é predominante a exploração denominada como convencional. Nesse tipo de exploração não há planejamento e certamente, não há qualquer cuidado com a floresta remanescente, ou seja, trata-se de uma exploração predatória (AMARAL et al., 1998; BRAZ et al., 1998; ESPADA et al., 2013; PINARD et al., 1995; SABOGAL et al., 2006). Nesse aspecto, a adoção do manejo florestal ajuda a reduzir os danos à floresta, favorece a manutenção das espécies e gera benefícios sociais e econômicos.

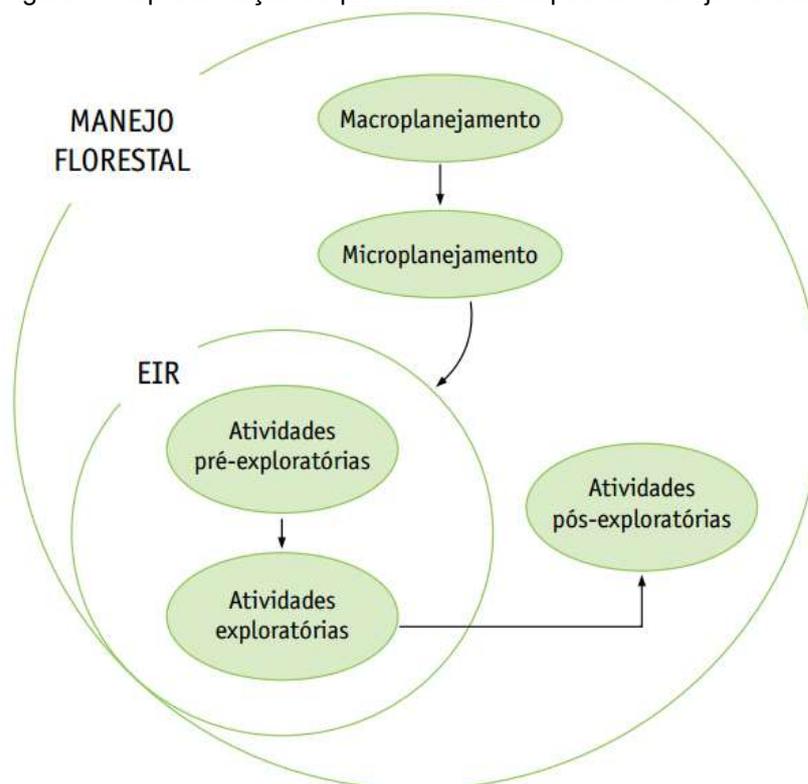
Espada et al. (2013, p. 10) traz a seguinte definição para manejo florestal: “[...] o uso de práticas de planejamento e princípios de conservação que visam garantir que uma determinada floresta seja capaz de suprir, de forma contínua, um determinado produto ou serviço.”.

De uma forma resumida, o manejo florestal é o emprego de planejamento na exploração, visando maximizar a produtividade e reduzir o desperdício, combinado com as práticas de exploração de impacto reduzido (EIR) que envolve atividades para reduzir danos à vegetação remanescente e atividades de pós-colheita que incluem tratamentos silviculturais para estimular a regeneração florestal e proteger a área (SIST, 2000). Nesse sentido, pode-se definir o manejo florestal sustentável (MFS) como sendo o manejo florestal combinado com atividades que garantam a disponibilidade dos serviços florestais econômicos, sociais e ambientais para as gerações futuras (BRAZ et al., 1998; SABOGAL et al., 2006; REIS et al., 2013).

Observa-se na definição que o ponto central do manejo florestal é o planejamento, e assim como em qualquer outra área, o planejamento da exploração florestal envolve responder quatro questões chave: O que será explorado? Onde será explorado? Quanto será explorado? E como será explorado? As três primeiras perguntas são respondidas em nível estratégico ou tático e a quarta pergunta é respondida em nível operacional.

O manejo florestal pode ser dividido em quatro grandes etapas: Macroplanejamento da exploração florestal; o Microplanejamento; a Exploração dos recursos florestais, que envolve atividades pré-exploratórias e exploratórias; e as Atividades pós-exploratórias (Figura 1).

Figura 1. Representação esquemática das etapas do manejo florestal



Fonte: (BALIEIRO et al., 2010, p. 90).

A etapa de macroplanejamento é o momento em que são obtidas as informações necessárias para a tomada de decisão relacionada à viabilidade econômica do empreendimento e serve também para subsidiar as demais atividades. O microplanejamento é o momento em que a empresa fará o planejamento detalhado ao nível da Unidade de Produção Anual (UPA). A etapa de exploração é o período de execução do plano de manejo e, por fim, as atividades pós-exploratórias são o momento em que são realizados tratamentos silviculturais para estimular a regeneração da floresta e são tomadas providências para a proteção da área (BALIEIRO et al., 2010; SABOGAL et al., 2006; SIST, 2000).

### 2.1.1 Macroplanejamento

É durante o macroplanejamento que se obtêm informações mínimas a respeito da Unidade de Manejo Florestal (UMF) que se pretende explorar, como: o inventário amostral, a base cartográfica da área, as atividades que podem ser desenvolvidas, os preços mínimos a praticar, a lista de espécies comerciais, o volume estimado para a exploração anual, o estudo de viabilidade técnica e econômica, entre outras (BALIEIRO et al., 2010). Tais informações são valiosas para que a empresa do ramo florestal possa avaliar e tomar decisões concernentes à exploração da área.

As informações obtidas permitirão à empresa florestal realizar as seguintes atividades: a seleção das áreas aptas ao manejo florestal; a quantificação do potencial da floresta para o manejo; a avaliação da viabilidade econômica do empreendimento; a definição das estratégias de gerenciamento da floresta; o dimensionamento e a definição das áreas das UPAs; a definição e o dimensionamento das infraestruturas gerais; e a quantificação e definição da necessidade de recursos humanos (AMARAL et al., 1998; BALIEIRO et al., 2010; ESPADA et al., 2013).

A realização da seleção das áreas aptas para exploração envolve a definição de áreas da UMF, como: áreas de preservação permanente (APP), áreas inacessíveis, áreas já abertas com construção ou sem cobertura florestal e áreas de reserva absoluta, no caso de floresta pública em que foi obtida uma concessão para a exploração (BALIEIRO et al., 2010; ESPADA et al., 2016). A área de reserva absoluta equivale a 5% da UMF que deve permanecer inalterada, para fins de comparação futura em relação aos impactos ambientais (AMARAL et al., 1998; ESPADA et al., 2013).

As APPs são áreas da floresta que margeiam rios, igarapés, morros com inclinação superior a 45°, topo de morros, montes, montanhas e nascentes. As áreas inacessíveis são aquelas que, embora a legislação não impeça de serem exploradas são consideradas inviáveis para exploração por várias razões, como: Impacto ambiental, riscos de acidentes e custos elevados. Por exemplo, áreas com inclinação superior a 40% requerem um alto custo de arraste e sofreriam um elevado impacto ambiental no uso de trator de esteira ou *skidder* e, com isso, devem ser consideradas inacessíveis para exploração mecanizada (AMARAL et al., 1998; DYKSTRA; HEINRICH, 1996; ESPADA et al., 2013; EZZATI et al., 2015; PICCHIO et al., 2018; SIST, 2000).

A quantificação do potencial da floresta para o manejo florestal envolve a realização de inventário amostral, que servirá de base para uma estimativa do potencial madeireiro da floresta. Esse inventário amostral servirá de base também para estimar o investimento necessário e o retorno, permitindo assim a avaliação da viabilidade econômica da exploração da área. A definição das estratégias de gerenciamento da floresta é o planejamento da utilização da floresta, cuja principal fonte de informação é: a definição das áreas aptas; o inventário amostral e os regulamentos específicos (AMARAL et al., 1998).

O manejo florestal no Brasil deve ser executado no sistema policíclico. Nesse sistema as operações de colheita são aplicadas periodicamente em apenas uma parte dos indivíduos e das espécies comerciais e os cortes são executados em intervalos regulares. O objetivo é preservar a estrutura da floresta e de suas funções, e de manter a diversidade biológica. Dessa forma, a exploração é aplicada em uma UPA e é permitido apenas o corte seletivo das espécies comerciais.

O número de UPAs é definido com base no ciclo de corte que será adotado no manejo florestal da área. O ciclo de corte é o período reservado para que a floresta se recupere até que possa ser realizada uma nova intervenção. A norma brasileira define que o ciclo de corte deve ser estabelecido entre 25 e 35 anos para a exploração mecanizada (até  $30 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ) e no mínimo 10 anos para a não mecanizada (até de  $10 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ) (BRASIL, 2002, 2006b, 2006c, 2009; BRAZ et al., 1998; REIS et al., 2013).

Assim, para um ciclo de corte de 25 anos, por exemplo, a UMF deverá ser dividida em 25 UPAs que possibilitem a exploração ao longo dos anos, ou seja, a cada ano  $1/25$  desta UMF será explorada. Garante-se então que cada UPA da área florestal terá 25 anos para se recuperar antes de uma nova intervenção e, dessa forma, a empresa poderá obter recursos da área de forma contínua (BALIEIRO et al., 2010; ESPADA et al., 2013; REIS et al., 2013).

Outro aspecto que deve ser levado em consideração na exploração da UPA é a intensidade máxima de corte. Atualmente, o mercado observa a resolução 406/2009 do CONAMA que define uma relação entre a intensidade máxima de corte e o ciclo de 0,86. Assim, para o exemplo de ciclo de corte igual a 25 anos, a intensidade máxima de corte é de  $21,5 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  (ESPADA et al., 2013). Assim sendo, se a empresa deseja extrair um volume maior de madeira, ou seja, uma exploração mais intensiva, então, o ciclo de corte deverá ser maior.

O dimensionamento das infraestruturas gerais está relacionado à definição de estradas principais, estradas de acesso, entre outras que são necessárias ao plano de infraestruturas que deverá ser realizado no microplanejamento, como: estradas secundárias, pátios de estocagem e trilhas e, por fim, a quantificação e definição de recursos humanos que permitirá estimar, com base no inventário amostral e demais informações produzidas, o quantitativo necessário de profissionais, treinamentos, entre outros.

De posse das informações obtidas durante o macroplanejamento, a empresa florestal poderá então elaborar o Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). Para explorar uma floresta nativa na Amazônia é necessário elaborar o PMFS para atender aos requisitos legais. Logo, trata-se de um documento oficial que deve ser apresentado ao órgão ambiental com a Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) emitida pelos engenheiros florestais que elaboraram o plano (AMARAL et al., 1998; ESPADA et al., 2013).

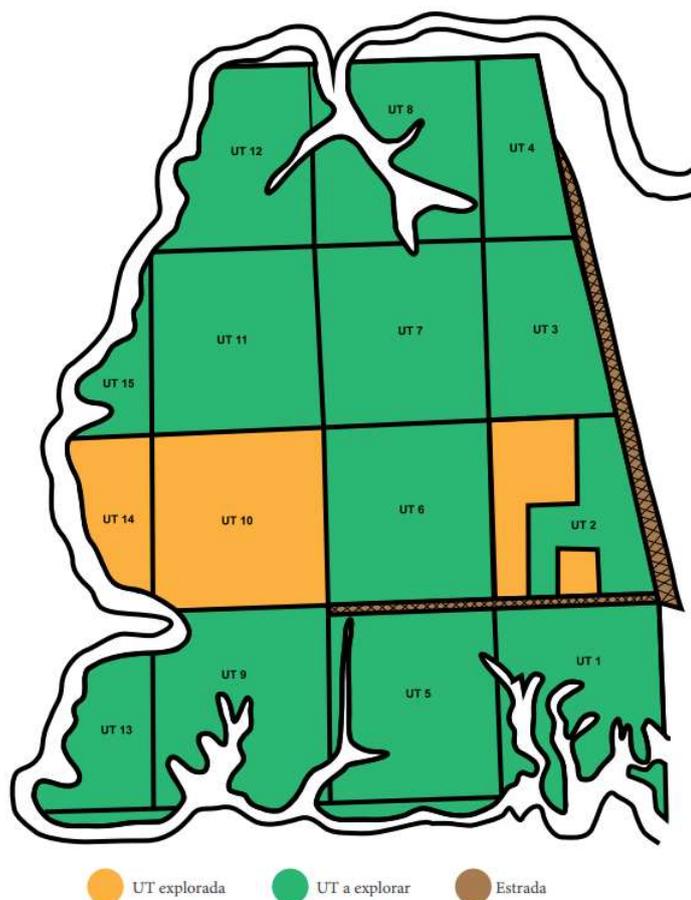
### **2.1.2 Microplanejamento**

Enquanto o macroplanejamento é aplicado ao plano geral da exploração de toda a UMF, o microplanejamento é concentrado na exploração da UPA. Nesse caso, o objetivo é realizar o plano em nível operacional que envolverá a produção, os recursos humanos, o maquinário e os investimentos necessários para o período de exploração da UPA. Para proceder com o planejamento são necessárias informações provenientes de atividades realizadas antes da exploração florestal, as denominadas atividades pré-exploratórias (Figura 1). Os produtos desse planejamento resultam em um Plano Operacional Anual (POA) que deve ser submetido ao órgão competente para avaliação (BALIEIRO et al., 2010; ESPADA et al., 2016).

As atividades pré-exploratórias fazem parte do microplanejamento, e devem ser realizadas no mínimo um ano antes da exploração da área. É nesse momento que são planejadas e construídas as infraestruturas que possibilitam a exploração da UPA. Envolve a execução das seguintes atividades: a delimitação das Unidades de Trabalho (UT), o inventário florestal 100%, os tratos silviculturais pré-exploratórios, o inventário contínuo, o processamento de dados, a confecção de mapas, e o planejamento das infraestruturas (BALIEIRO et al., 2010; BRAZ et al., 1998).

A UT tem por finalidade facilitar a divisão do trabalho e controle das atividades que serão executadas na UPA e deverá ser delimitada conforme a capacidade operacional do empreendimento. A Figura 2 mostra um exemplo de divisão da UPA em UTs.

Figura 2. Divisão da UPA em UTs para a execução do manejo florestal



Fonte: (ESPADA et al., 2013, p. 17).

O inventário florestal 100% (censo florestal) é a atividade responsável pelo levantamento detalhado de todas as árvores comerciais ou potencialmente comerciais, inclusive as árvores que ainda não estão em idade de corte, ou seja, só poderão ser exploradas em futuras colheitas. As informações coletadas são dendrométricas (altura, diâmetro à altura do peito [DAP] e qualidade do fuste), a espécie e a localização (AMARAL et al., 1998; BRAZ et al., 1998; ESPADA et al., 2013).

O método convencional de obter a localização da árvore é realizado com o uso de trena a partir do rastro da trilha para a obtenção do eixo Y e para obter o eixo X, mede-se a distância da árvore até a picada (eixo Y). Esse método é oneroso e impreciso, com isso, aos poucos, as empresas do ramo vêm substituindo esse método pelo uso de GNSS combinado com ferramentas de SIG (AMARAL et al., 1998; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; FFT, 2002).

Durante o inventário, outras informações relevantes para o planejamento também são obtidas, como a ocorrência de grotas, de cursos d'água, de área de cipoal, entre outras. Assim, são os dados de inventário que possibilitam o

planejamento da exploração, o dimensionando da equipe de campo, da intensidade de corte, a definição das técnicas de exploração, as medidas que devem ser tomadas para promover o manejo de impacto reduzido, dentre outros. O inventário florestal 100% é um item obrigatório para o POA (ESPADA et al., 2013; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

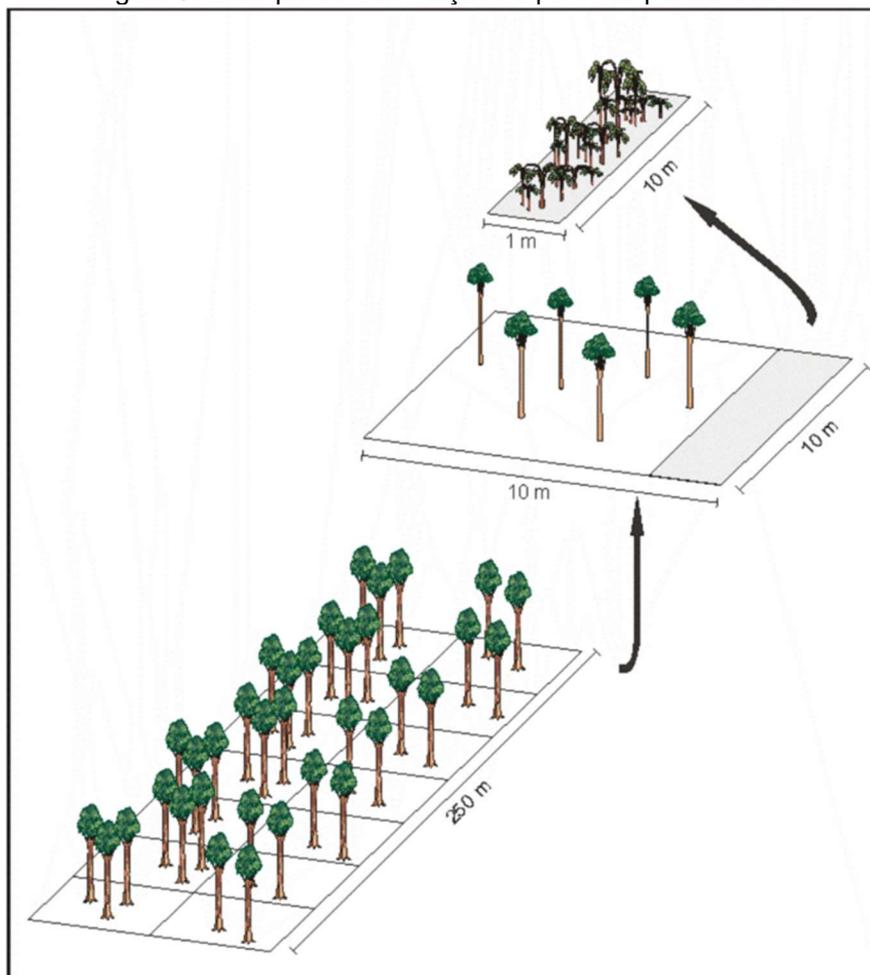
Para que uma árvore seja considerada uma árvore comercial, deve-se levar em conta o diâmetro mínimo de corte que deve ser maior ou igual a 50 centímetros. Para realizar a medida, adota-se como referência o diâmetro a altura do peito (DAP), que é a medição a 1,3 metros de altura a partir do solo. As árvores comerciais com diâmetro inferior serão consideradas remanescentes e somente poderão ser abatidas em um ciclo posterior, caso tenham atingido o diâmetro mínimo (CAMPOS; LEITE, 2013; ESPADA et al., 2013).

O CONAMA estabelece que não devem ser exploradas um mínimo de 10% das árvores comerciais com DAP superior a 50 cm em cada 100 ha de UT para favorecer a regeneração, essas são as denominadas árvores porta-sementes. Para espécies raras, deve-se manter um mínimo de 4 indivíduos em cada 100 ha. Há ainda a necessidade de manutenção de árvores protegidas por lei e árvores que possuem ninho (BRASIL, 2009; ESPADA et al., 2013).

Os tratos silviculturais são intervenções na floresta, geralmente necessárias para melhorar as condições de execução da exploração. Por exemplo, em uma área com muitos cipós, é recomendável efetuar o corte dos que estiverem presos às árvores. Uma prática eficiente é realizar os tratos silviculturais durante a atividade de inventário florestal 100% para aproveitar a mesma equipe (AMARAL et al., 1998; FFT, 2002).

O inventário contínuo (ou inventário amostral permanente) tem um objetivo diferente do inventário 100%, pois sua função é monitorar o crescimento e a regeneração da floresta. A recomendação é que o primeiro seja realizado antes da exploração, a segunda medição um ano depois, a terceira medição três anos depois e as demais a cada cinco anos. As medições são feitas em parcelas permanentes, que são delimitações realizadas na floresta, geralmente com área de 1 ha para cada 250 ha de área manejada conforme apresentado no exemplo (Figura 3) (AMARAL et al., 1998; CAMPOS; LEITE, 2013).

Figura 3. Exemplo de delimitação de parcelas permanentes



Fonte: (FFT, 2002, p. 25).

O processamento de dados, nada mais é do que o uso de ferramentas de informática para armazenar e processar as informações de inventário e dentre outras. A confecção de mapas é uma etapa crucial, pois permite maior precisão nas práticas de campo e com isso, favorece a EIR. O planejamento das infraestruturas envolve planejar a localização de estradas e pátios de estocagem. Geralmente é realizada com base em mapas, com uma validação posterior em campo, para evitar possíveis obstáculos (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

A localização de estradas e pátios pode ocasionar impactos ambientais, pois envolve a abertura de áreas na floresta, causando danos (ao solo, a fauna e a flora) e fragmentação. Além disso, a localização inadequada dessas estruturas incorre no aumento de custos na construção e no transporte. Assim, é de suma importância um excelente planejamento da localização das infraestruturas para minimizar a abertura de áreas e custos e contribuir para a sua regeneração (BOWMAN; HESSLER, 1983; EZZATI et al., 2015; HOLMES et al., 2002; PICCHIO et al., 2018; SILVA et al., 2018a; SOUZA; SOARES, 2013).

Outro aspecto que deve ser observado é a construção dessas instalações, pelo menos um ano antes do início das atividades de exploração. Esta medida possibilitará que o solo possa ter uma boa compactação, o que favorece uma boa trafegabilidade das máquinas e caminhões (ESPADA et al., 2013; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; FFT, 2002).

O resultado final do microplanejamento é incluído no POA, que é o plano em nível de exploração da UPA. O POA deve ser apresentado pelo engenheiro florestal anualmente para a exploração da UPA planejada para o ano seguinte. O órgão ambiental fará então a avaliação do POA e emitirá a autorização, quando for o caso (AMARAL et al., 1998; SABOGAL et al., 2006).

### **2.1.3 Atividades exploratórias**

Na etapa de atividades exploratórias, se concentram grande parte das práticas de exploração de impacto reduzido (EIR). Envolve o planejamento prévio com o objetivo de minimizar danos, custos e acidentes de trabalho durante a colheita. Naturalmente, é neste momento que as atividades de colheita serão executadas. Para atender a EIR vários aspectos deverão ser observados no momento da colheita, como: O teste do oco, abertura de caminhos de fuga, técnicas de corte direcionado e aproveitamento máximo do volume do fuste (BRAZ et al., 1998; ESPADA et al., 2013).

Após abater as árvores, corta-se a copa e os fustes são arrastadas até o pátio de estocagem. Para isso, são utilizadas as trilhas de arraste. Além disso, técnicas são aplicadas antes e depois do abate para minimizar os danos ao solo e às arvores em pé. No pátio, as toras são identificadas para possibilitar a rastreabilidade da madeira e posteriormente são embarcadas em caminhões para serem levadas à indústria madeireira. Neste caso, as estradas secundárias possibilitam o acesso do pátio de estocagem até a estrada principal que por sua vez conduzirá até as estradas de acesso (AMARAL et al., 1998; ESPADA et al., 2013).

### **2.1.4 Atividades pós-exploratórias**

As atividades pós-exploratórias têm por objetivo viabilizar os próximos ciclos de corte. Para isso, são realizados levantamentos dos danos provocados e do crescimento da floresta e são propostas medidas para favorecer o crescimento florestal. São então sugeridas manutenções nas infraestruturas, para viabilizar o acesso em ciclos futuros, evitando a necessidade de reconstrução. É realizada a

avaliação de danos e desperdícios ocorridos. Isso permitirá observar se o crescimento está sendo prejudicado. Uma forma de realizar tal avaliação é fazendo a comparação de parcelas exploradas com parcelas em que não houve intervenção (ESPADA et al., 2013; HOLMES et al., 2002).

A análise dos desperdícios envolve percorrer a floresta e levantar os quantitativos de toras com oco, toras esquecidas, a altura dos tocos, toras rachadas, entre outros. Essa análise é importante, pois os desperdícios envolvem custo sem retorno, além dos danos à floresta. Desta forma, medidas precisam ser planejadas para mitigar tais ocorrências em atividades futuras (ESPADA et al., 2013; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; HOLMES et al., 2002).

Outra atividade desta fase é a realização do inventário contínuo que permitirá acompanhar o crescimento da floresta para estimar o volume em próximos ciclos e os impactos nas espécies comerciais. De posse desses dados, a próxima atividade é a realização de tratamentos silviculturais, como: corte direcionado; limpeza da área; desbaste; entre outros, para favorecer o crescimento da floresta remanescente. Estes tratamentos têm por objetivo aumentar o valor futuro da floresta e oferecer benefícios ecológicos para as espécies afetadas pela exploração. Por fim, são tomadas medidas de proteção à floresta, como: Prevenir e conter o fogo, colocar placas de proibição, controlar atividades de caça, de pesca, tomar medidas mitigatórias contra invasão de terras, entre outras (AMARAL et al., 1998; ESPADA et al., 2013).

### **2.1.5 Cenário atual do manejo florestal na Amazônia**

Embora o manejo florestal traga uma significativa melhora no uso dos recursos, Figueiredo, Braz e d'Oliveira (2007) mencionam que ainda há um elevado número de empresas que adotam o método convencional de localização e mapeamento de árvores e hidrografia (FFT, 2002; REIS et al., 2013).

Esta prática resulta em baixa precisão e ineficiência no planejamento e execução do projeto de exploração florestal, levando a problemas, como: A abertura de estradas para acessar áreas com baixo potencial produtivo, a abertura de pátios com dimensões acima do necessário, imprecisão na localização da árvore, imprecisão no mapeamento de APPs, construção em excesso de pontes e ineficiência no monitoramento (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

Uma alternativa que tem apresentado bons resultados para aumentar a precisão e eficiência no manejo florestal é o uso da metodologia Modelo Digital de Exploração Florestal (Modelflora). De acordo com a Embrapa (2015), de 2008 a 2015 o Modelflora foi adotado em mais de 272 mil hectares de manejo florestal, proporcionando uma economia de R\$ 53,7 milhões. Tal modelo tem ganhado espaço entre as empresas do ramo.

O Modelflora é um método que busca aumentar a precisão com a combinação do uso de SIG com o uso de recursos de Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) e imagens de sensores remotos, como radar e satélites para inventariar a floresta. Assim, a combinação desses recursos no processo do Modelflora possibilita integrar o planejamento florestal realizado com a operação de exploração florestal por meio de um sistema rastreado por satélite (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

Contudo, as infraestruturas necessárias às atividades de exploração em campo, com alto impacto ambiental e que envolvem o emprego de elevado investimento, ainda carecem de aprimoramento em seu planejamento, como é o caso de estradas e pátios. Otimizar a instalação de tais infraestruturas pode favorecer o empreendimento florestal em vários aspectos, como: A regeneração da floresta, o aumento da produtividade de exploração em campo, a redução de custos de maquinário e pessoal e a redução no tempo de planejamento.

## 2.2 ESTRADAS

As estradas são fundamentais para o desenvolvimento econômico e social. É por meio delas que ocorre a maior parte do transporte de pessoas e dos excedentes de produção. Em São Paulo, por exemplo, o transporte de carga em rodovia representa mais de 70% do total, enquanto o ferroviário representa menos de 15% (SENÇO, 2007).

A estrutura que se constrói sobre o leito de terra para obter a estrada de rodagem pode variar em muitos aspectos, como: O material utilizado, a espessura e a sua função. Assim, as estradas podem basicamente ser classificadas de quatro formas: pela posição geográfica; quanto a sua função; pela sua jurisdição e pelas condições técnicas (MACHADO, 2013; PONTES FILHO, 1998).

O território brasileiro é dividido em áreas federais, estaduais e municipais. Assim, quando uma estrada está localizada em uma área da federação, a sua

classificação pela posição geográfica é precedida pela sigla BR e quando se encontra em área estadual, sua classificação é precedida pela sigla do estado (LEE, 2005; MACHADO, 2013).

A classificação pela jurisdição segue a mesma lógica, mas neste caso faz uma referência à responsabilidade pela estrada em termos de manutenção, segurança no tráfego entre outras questões. Assim, são classificadas em rodovias federais; rodovias estaduais; municipais e vicinais. As vicinais, geralmente são municipais, pavimentadas ou não, de uma só pista e que promovem a integração na região em que se situam (MACHADO, 2013; PONTES FILHO, 1998; SENÇO, 2007).

A classificação funcional está relacionada à função que a estrada exerce, podendo ser: arterial, responsável pelo tráfego de longa distância; coletora, responsável pelo tráfego em uma área específica e local, geralmente responsável pelo tráfego intramunicipal. Na classificação de condição técnica, em geral são consideradas características como: Velocidade, rampas, largura da pista, raio de curvatura, visibilidade, entre outras (LEE, 2005; MACHADO, 2013; PONTES FILHO, 1998; SENÇO, 2007).

A classificação de estradas pode aparentar algo de menor importância, contudo ela é relevante, pois é por meio de sua correta definição que o projeto de construção e manutenção de estradas será devidamente dimensionado (SENÇO, 2007).

### **2.2.1 Planejamento de estradas**

O planejamento de estradas requer diferentes níveis de decisão, se dividindo em planejamento estratégico, tático e operacional. Independentemente do nível, o planejamento precisa ser um processo contínuo, com registro regular, para que o plano possa ser atualizado conforme as condições mudarem. O planejamento em nível estratégico e tático envolve uma análise de toda a rede rodoviária. Normalmente com seções rodoviárias agrupadas por nível de tráfego e condição da estrada. Além disso, exige uma análise do ciclo de vida do custo de construção, da manutenção e do usuário da estrada em toda a rede (OVERGAARD, 2004).

Em nível operacional é de suma importância planejar os aspectos técnicos da estrada, como: A geometria e a drenagem da estrada, pois rodovias que não consideram estes aspectos tem a eficiência reduzida em operações de transporte e apresentam problemas de segurança. Para planejar a geometria e a drenagem da

estrada, são necessárias informações da área em que a nova infraestrutura será implantada, como: O tamanho da área, as informações da hidrologia local, as informações geológicas e geotécnicas, as topográficas, as informações do solo, o clima, a trafegabilidade, a rede viária existente e os recursos financeiros disponíveis (AASHTO, 2001; BAEK; CHOI, 2017; LSELEY; GOKHALE, 2002; OVERGAARD, 2004; THAGESEN, 2004).

## **2.2.2 Aspectos Técnicos de estradas**

### **2.2.2.1 Projeto geométrico**

Para garantir a segurança no tráfego e a produtividade na movimentação dos veículos utilizados na estrada, o alinhamento deve atender a determinadas especificações de projeto geométrico. Os principais elementos das especificações do projeto geométrico são a largura da faixa, o traçado, as curvas horizontais, curvas verticais e o gradiente máximo de alinhamentos verticais (BAEK; CHOI, 2017; FALCK-JENSEN, 2004; LEE, 2005; SENÇO, 2007; SESSIONS et al., 2007).

Para proceder com a geometria, primeiro é necessário definir o traçado, com base na geomorfologia e nas características geométricas da região. Tais características irão impor a necessidade de curvas, cortes e aterros, que, como já mencionado, requerem um projeto eficiente. O projeto geométrico engloba os perfis horizontal, vertical e transversal. O perfil horizontal compõe trechos retos e curvos, o perfil vertical contém trechos retos conectados por curvas côncavas e convexas e o perfil transversal se refere ao corte que é feito na estrada por um plano vertical perpendicular ao eixo (LEE, 2005; PONTES FILHO, 1998).

#### **2.2.2.1.1 Traçado**

A definição do traçado pode ser subdividida em duas etapas, reconhecimento e exploração. Ao determinar o traçado sempre haverá a necessidade de interligar dois pontos (origem e destino) e várias diretrizes podem ser utilizadas para determinar o itinerário ao longo do terreno. Assim, o reconhecimento é a etapa que tem o objetivo de escolher a diretriz que possibilite estabelecer o melhor traçado, que seja viável em termos técnicos e econômicos (LEE, 2005; PONTES FILHO, 1998).

Ao longo da determinação do traçado, podem vir a serem identificados pontos intermediários que devem obrigatoriamente ser atingidos ou evitados, por questões de ordem social, econômica ou estratégica. Assim, o reconhecimento envolve a identificação de características de interesse, como: Classificação orográfica da

região (plana, ondulada, montanhosa), uso do solo, áreas com restrições ambientais (reservas, áreas indígenas, etc.), acidentes geográficos (rios, lagoas, quedas d'água, etc.) e tipos de solos (BRASIL, 1999a; LEE, 2005; PONTES FILHO, 1998; SENÇO, 2008).

Após o reconhecimento, é possível proceder com a exploração que envolve o levantamento detalhado da diretriz definida para a obtenção de uma planta planialtimétrica da faixa do terreno. O objetivo desta planta é fornecer o maior número possível de informações da superfície representada para efeitos de estudo e planejamento do projeto de forma viável. Uma planta planialtimétrica é composta de curvas de nível para a devida representação do relevo (BRASIL, 1999a; LEE, 2005; PONTES FILHO, 1998; SENÇO, 2008). Os recursos computacionais atuais possibilitam a construção de modelos digitais do terreno que funcionam como excelentes substitutos às antigas plantas planialtimétricas.

Os elementos do traçado, como retas, curvas horizontais e verticais, se combinados em planta e em perfil, resultam em formas tridimensionais de diferentes aparências. A Figura 4 apresenta as conjugações básicas e seus resultados conforme a percepção do usuário em relação ao traçado. Deve-se sempre buscar um traçado em que seus elementos geométricos sejam coordenados, de modo a permitir o adequado controle das condições de dinâmica do movimento que o traçado imporá e das condições de visualização (LEE, 2005; SANTA CATARINA, 2000).

Figura 4. Elementos espaciais em planta e em perfil

Em planta	Em perfil	Elemento Espacial
 Tangente	 Trecho reto	 Tangente com inclinação longitudinal constante
 Tangente	 Curva	 Concavidade em tangente
 Tangente	 Curva	 Convexidade em tangente
 Curva	 Trecho reto	 Curva horizontal com inclinação longitudinal constante
 Curva	 Curva	 Concavidade com curva horizontal
 Curva	 Curva	 Convexidade com curva horizontal

Fonte: Adaptado de Santa Catarina (2000, p. 33).

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) faz recomendações por meio de normas, como: Constituir os traçados em planta por arcos de raio e desenvolvimento, tão amplos quanto à topografia permitir, evitar tangentes longas, exceto em condições especiais, dentro do possível, estabelecer traçados direcionais e adaptados à topografia, evitar curvas de raios pequenos ou muito grandes, não impor grandes variações em raios de curvas consecutivas, concordar curvas horizontais de sentidos opostos e não concordar curvas horizontais de mesmo sentido com tangente intermediária curta (BRASIL, 1999b; LEE, 2005; SENÇO, 2008).

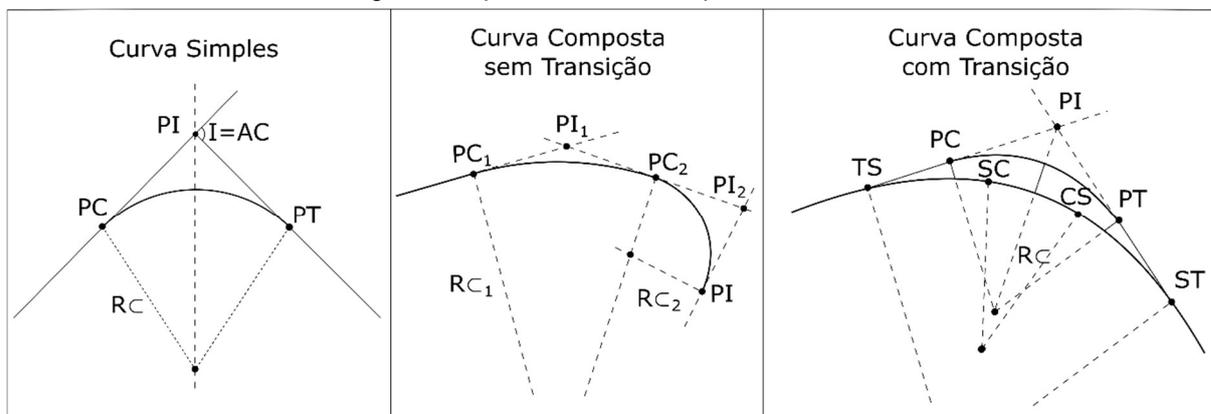
No caso do traçado em perfil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) faz recomendações, como: Traçar o greide suave e uniforme, manter declividade igual ou superior a 1% em trechos em corte, evitar concavidades

em trechos em corte, para minimizar problemas com drenagem superficial e greides elevados em regiões planas. Ao combinar o traçado em planta e em perfil, deve-se evitar tangentes e curvas horizontais de grandes raios associadas a rampas elevadas; evitar curvas horizontais de pequenos raios associadas a curvas pequenas; sempre que possível associar tangentes longas com curvas verticais côncavas e iniciar curva horizontal antes da curva vertical (BRASIL, 1999b).

### 2.2.2.1.2 Perfil horizontal

Estradas retas são mais produtivas, assim, geralmente a necessidade de curvas ocorre devido a obstáculos que são economicamente ou ambientalmente inviáveis de serem transpostos. Há basicamente três tipos de curvas (Figura 5): Curva simples (curva circular), curva composta sem transição e curva composta com transição (espiral). Dentre estas, a curva circular é, geralmente, adotada, devido à suas boas propriedades em termos de tráfego e de materialização do projeto em campo (AASHTO, 2001; LEE, 2005; PONTES FILHO, 1998; SENÇO, 2008; SESSIONS et al., 2007).

Figura 5. Tipos de curvas em perfil horizontal



Fonte: Adaptado de Senço (2008, p. 308-335).

Em que: PC = ponto de início da curva; PI = ponto de interseção das tangentes; PT = ponto de término da curva circular; R = raio da curva;  $I = AC$  = ângulo de deflexão das tangentes igual ao ângulo central da curva; TS = ponto Tangente-Espiral; SC = ponto Espiral-Curva Circular; CS = ponto Curva Circular-Espiral; ST = ponto Espiral-Tangente; C = ângulo central.

Para projetar uma curva horizontal segura, o projetista considera minimamente o raio mínimo da curva e a distância de visibilidade de parada (AASHTO, 2001; FALCK-JENSEN, 2004; LEE, 2005; SENÇO, 2007, 2008; SESSIONS et al., 2007). A distância de visibilidade de parada (DVP) fornece uma

referência de distância em que será possível ao condutor parar o veículo com segurança, caso seja necessário (AKAY, 2006).

A DVP (em metros) pode ser calculada por meio da equação 1 (AASHTO, 2001). Além disso, pode-se obter o valor de referência em manuais, como por exemplo, o Quadro 1 que apresenta valores para a DVP em diferentes velocidades de projeto de estrada, considerando o tempo de reação do motorista como 2,5 segundos.

$$DVP = 0,278vt_r + 0,039 \frac{v^2}{a} \quad (1)$$

Em que:  $DVP$  = distância de visibilidade de parada;  $v$  = velocidade diretriz (km h<sup>-1</sup>);  $t_r$  = tempo de percepção e reação (s), geralmente adotado 2,5 s;  $a$  = razão de desaceleração (ms<sup>-2</sup>), geralmente 3,4 ms<sup>-2</sup>.

Quadro 1. Valores de referência para DVP  
(tempo de reação em 2,5 segundos)

Velocidade diretriz (km/h)	DVP (m)
30	30
40	45
50	65
60	85
70	110
80	140

Fonte: adaptado de SESSIONS et al. (2007, p. 14).

O raio da curva é o fator de maior influência na restrição do tráfego no local, pois quanto menor for o raio, mais restritiva será a condução do veículo na curva. A velocidade diretriz é o principal fator que afeta a determinação do raio mínimo da curva. A velocidade diretriz ( $V_D$ ) refere-se à velocidade máxima em que é possível trafegar com conforto e segurança em um trecho de estrada (AASHTO, 2001; EASA, 2002; SESSIONS et al., 2007).

O raio mínimo da curva é influenciado pela declividade transversal (ou superelevação), pelo deslizamento lateral dos veículos na pista e naturalmente, pela velocidade diretriz (AKAY, 2006). O raio mínimo da curva pode ser calculado por meio da equação 2 (AASHTO, 2001).

(2)

$$R_{min} = \frac{V^2}{127(0,01e_{max} + f_{max})}$$

Em que:  $R_{min}$  = raio mínimo de curvatura (m);  $V$  = velocidade diretriz (kmh-1);  $e_{max}$  = superelevação máxima (%);  $f_{max}$  = coeficiente máximo de atrito lateral.

A superelevação é a declividade transversal da pista nos trechos em curva, introduzida com a finalidade de reduzir ou eliminar os efeitos da força lateral (centrifuga) sobre os passageiros e as cargas dos veículos em movimento. É útil também para escoar a água da pista, podendo neste caso, ser utilizada inclusive em trechos retos. Ela é medida em termos de inclinação transversal da pista em relação ao plano horizontal, sendo expressa em proporção ou em porcentagem. Em retas, a superelevação tem o formato abaulado e geralmente é de 2%, em curvas, ela apresenta declividade constante, inclinada para o bordo interno da curva, a taxa comumente adotada está entre 4 e 12% (AASHTO, 2001; BRASIL, 1999b; SENÇO, 2007, 2008).

O coeficiente de atrito refere-se ao deslizamento lateral, medido dinamicamente, isto é, com o veículo em movimento, assim, este valor é influenciado por variados fatores, como: Tipo de pavimento, velocidade do veículo, condições dos pneus e superelevação da curva. Desta forma, a determinação deste valor é complexa, e normalmente são adotados valores de referência fornecidos por organizações da área, como é o caso dos valores disponíveis no Quadro 2 (AASHTO, 2001; EASA, 2002; FALCK-JENSEN, 2004).

Quadro 2. Valores de referência de coeficientes de atrito lateral

Velocidade diretriz (km/h)	Overseas Road Note 6	SATCC
30	0,60	-
40	0,55	0,40
50	0,50	-
60	0,47	0,38
70	0,43	-
80	-	0,36
85	0,40	-
100	0,37	0,34
120	0,35	0,32

Fonte: adaptado de Falck-Jensen (2004, p. 213).

Valores de referência para raio mínimo também são disponibilizados em manuais de projeto geométrico. No Brasil, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem disponibiliza valores de raio mínimo de curva horizontal de estradas, para variados valores de velocidade diretriz e de superelevação máxima, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3. Valores dos raios mínimos em função das taxas de superelevação (em metros)

Superelevação Máxima ( $e_{max}$ )	Velocidade Diretriz (km/h)									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
4%	30	60	100	150	205	280	355	465	595	755
6%	25	55	90	135	185	250	320	415	530	665
8%	25	50	80	125	170	230	290	375	475	595
10%	25	45	75	115	155	210	265	345	435	540
12%	20	45	70	105	145	195	245	315	400	490

Fonte: adaptado de Brasil (1999b, p. 71).

É possível observar (Quadro 3) que o raio mínimo diminui à medida que a superelevação aumenta. Isso ocorre porque a superelevação melhora as condições de dirigibilidade na curva horizontal, diminuindo a força centrífuga que atua sobre o veículo (LEE, 2005; SENÇO, 2008). Assim, para uma superelevação maior é possível reduzir o raio da curva mantendo as condições de segurança, eficiência e conforto.

#### 2.2.2.1.3 Perfil vertical

O perfil vertical de uma estrada tem uma forte influência sobre o custo de construção, o custo operacional dos veículos que utilizam a estrada e, ao combinar com o perfil horizontal, no número de acidentes. O alinhamento vertical deve ser projetado para um padrão econômico consistente com as necessidades do tráfego e da topografia. De preferência, também deve ser projetado para ser agradável esteticamente. Os dois principais elementos do alinhamento vertical são o greide, que está relacionado às características do veículo e ao nível de serviço (Quadro 4), e a curvatura vertical, que é influenciada pelos critérios de distância de visibilidade e conforto de dirigibilidade (EASA, 2002; FALCK-JENSEN, 2004).

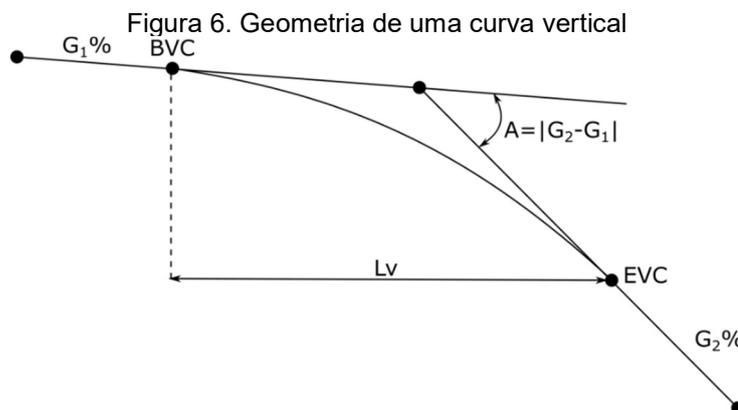
Quadro 4. Recomendação de valores máximos para Greide

Tipo de estrada	Classe de projeto	Tráfego	Greide (%)
Arterial	A	5.000 – 15.000	8
	B	1.000 – 5.000	8
	C	400 – 1.000	10
Coletora	C	400 – 1.000	10
	D	100 – 400	10
Acesso	D	100 – 400	10
	E	20 – 100	15
	F	< 20	15/20

Fonte: adaptado de Falck-Jensen (2004, p. 230).

O perfil vertical é composto de curvas que estabelecem a transição entre os greides ao longo da estrada. Geralmente, as curvas verticais são projetadas em formato parabólico e com uma taxa constante de mudança de gradiente (Figura 6), pois assim o alinhamento favorecerá um maior conforto na dirigibilidade, o planejamento será mais fácil de executar e a distância de visão é constante ao longo

da curva, o que oferece mais segurança (AASHTO, 2001; LEE, 2005; PONTES FILHO, 1998; SESSIONS et al., 2007).



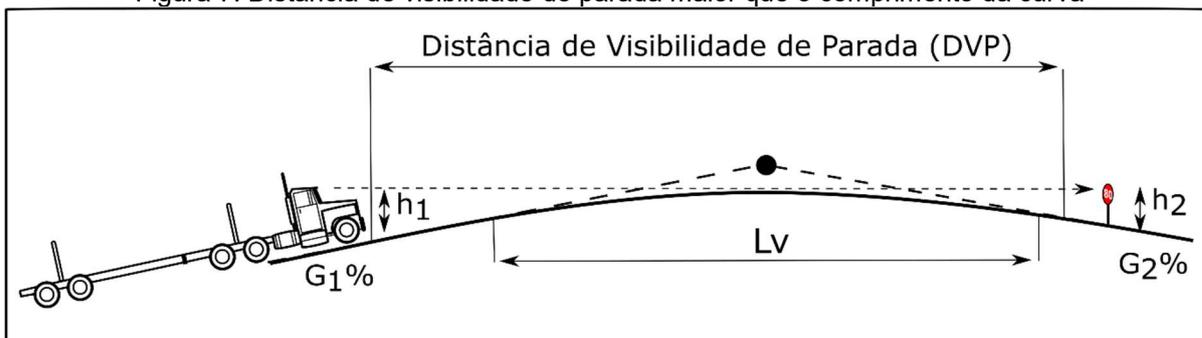
Fonte: adaptado Sessions (2007, p. 21).

Em que: BVC = ponto inicial da curva; EVC = ponto final da curva;  $L_v$  = comprimento da curva;  $G_1$  = greide tangente inicial;  $G_2$  = greide tangente final;  $A$  = diferença entre os greides tangentes.

Outra questão que deve ser considerada para aumentar a eficiência do tráfego na via é o comprimento mínimo que a curva vertical deve possuir (AKAY, 2006; SESSIONS et al., 2007). O comprimento mínimo da curva é influenciado pela distância de visibilidade de parada, que pode ser calculada conforme a Equação 1, já apresentada.

Para calcular o comprimento mínimo da curva, podem ocorrer duas situações. Na primeira, a distância de visibilidade de parada é maior que o comprimento da curva, ou seja, convexa (Figura 7), aplica-se a Equação 3. Na segunda situação a distância de visibilidade é menor que o comprimento da curva, ou seja, côncava, neste caso, aplica-se a Equação 4 (SESSIONS et al., 2007). As rampas ascendentes são positivas e as descendentes são negativas, assim, para determinar se a curva é convexa ou côncava, coloca-se um observador em um plano acima da curva, se a primeira rampa é positiva, a curva é convexa, caso contrário, será côncava (SENÇO, 2008).

Figura 7. Distância de visibilidade de parada maior que o comprimento da curva



Fonte: Adaptado de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2001, p. 271).

(3)

$$Lv = 2DVP - \frac{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A}$$

(4)

$$Lv = \frac{DVP^2 A}{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}$$

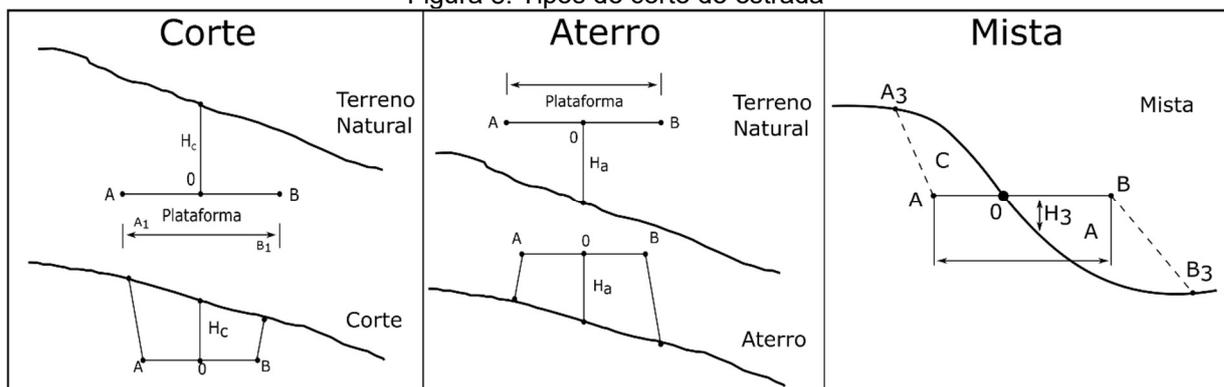
Em que:  $Lv$  = comprimento da curva (m);  $h_1$  = altura do olho do motorista em relação à superfície da estrada (m), geralmente atribuída como 1.080 m;  $h_2$  = altura de determinado objeto em relação a superfície da estrada (m), geralmente atribuída como 0.6 m;  $DVP$  = distância de visibilidade de parada (m);  $A$  = diferença entre os greides tangentes (%).

Observa-se então que o projeto de perfil geométrico permitirá determinar o traçado geométrico da estrada, promovendo viabilidade no tráfego local, conforto na dirigibilidade e segurança no trânsito.

#### 2.2.2.1.4 Perfil transversal

Após definir o traçado e projetar a geometria horizontal e vertical, resta planejar os elementos das seções transversais nos locais necessários. Há três tipos de perfil transversal: corte; aterro ou misto (Figura 8) (LEE, 2005; MACHADO, 2013; PONTES FILHO, 1998).

Figura 8. Tipos de corte de estrada



Fonte: Adaptado de Senço (2008, p. 422-423).

Em geral, os fatores que levam a necessidade de realizar adaptações na estrada por meio de corte ou aterro, são: a largura mínima que a faixa de trânsito deve possuir; a largura do acostamento; a necessidade de superelevação em tangentes e curvas; a superlargura em curvas e as sarjetas de cortes. As normas brasileiras estabelecem a largura mínima da faixa entre 3m e 3,75m, dependendo da classe do projeto (BRASIL, 1999b; LEE, 2005; PONTES FILHO, 1998). Somados os demais elementos da pista, como o acostamento e a superlargura, em determinados trechos será necessário realizar obras de aterro ou corte, de modo a permitir a viabilidade da construção da estrada.

Um fator importante, neste aspecto é a inclinação máxima da rampa de corte e da saia do aterro e a determinação desta inclinação depende basicamente do dimensionamento necessário para a estabilização geotécnica, que geralmente está associada aos materiais envolvidos. Quanto mais suaves forem as inclinações, mais segurança será oferecida ao tráfego. Contudo, em determinados tipos de declividade do terreno, isso pode significar mais custo, assim, as inclinações tendem a ser compatíveis com as declividades naturais dos terrenos (LEE, 2005).

Ao planejar uma seção transversal, deve-se seguir parâmetros técnicos, como ocorre nas definições de perfil horizontal e vertical. No Brasil, o DNIT estabelece por meio de normas os critérios técnicos para, dentre outros fatores: utilizar defensas ou barreiras rígidas em cristas de aterros; definir o comprimento de curvas verticais arredondadas em cristas de corte e aterro, bem como em pé de aterro; dimensionar abaulamento em cristas de cortes; afastamento mínimo de obstáculos da borda do acostamento; dimensionamento de sarjetas; corte de vegetação; alargamentos de corte; e faixa de domínio (BRASIL, 1999b; LEE, 2005).

### 2.2.2.2 Drenagem

Ao projetar o perfil geométrico, que inclui o perfil horizontal, vertical e transversal, alguns aspectos da drenagem são atendidos com a definição dos trechos de ocorrência da superelevação. Contudo, há outros aspectos da drenagem que devem ser observados.

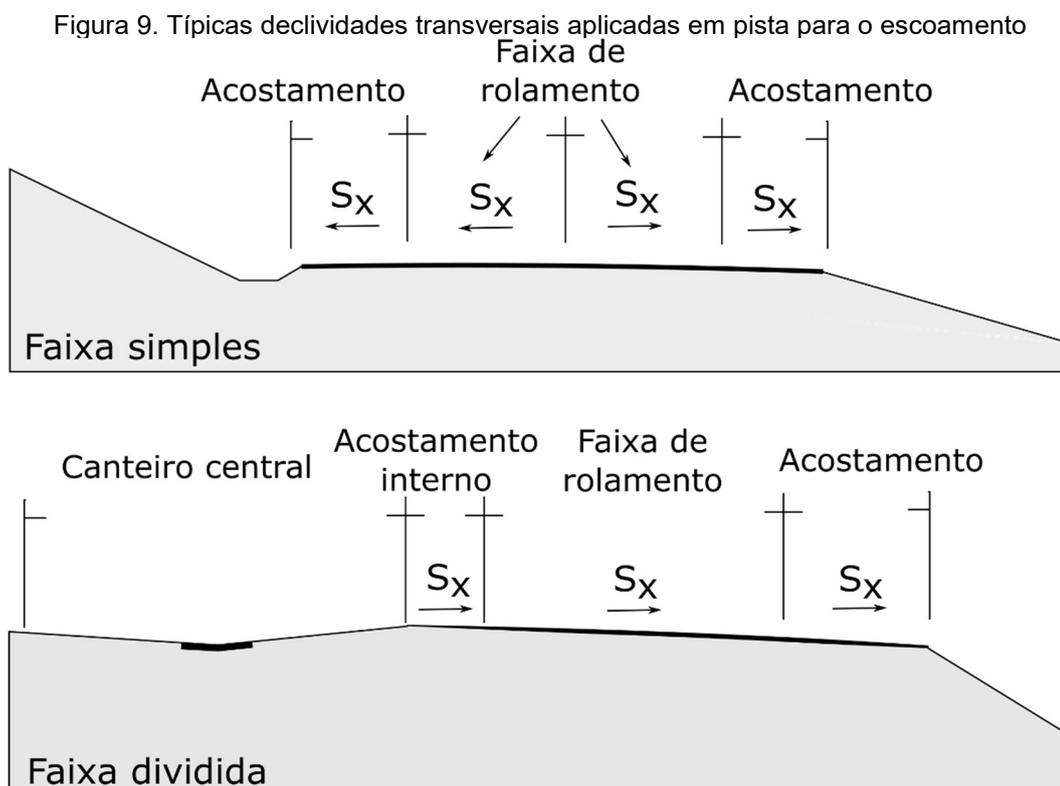
A drenagem é o processo pelo qual ocorre o escoamento das águas pluviais para fora do leito. A água é o principal agente destrutivo da estrada. Desta forma, um sistema de drenagem se faz necessário para garantir a boa trafegabilidade e a minimização dos danos locais que podem ocorrer, como a erosão. O sistema de drenagem é composto de variados tipos de instalações cujo objetivo é captar, escoar e desaguar em local seguro o excesso de água (HALD et al., 2004; SESSIONS et al., 2007; SUZUKI; AZEVEDO; JÚNIOR, 2013; WEAVER; HAGANS, 1994).

O sistema de drenagem tem quatro funções principais: escoar a água da chuva da superfície para fora da pista; controlar o nível do lençol freático no subleito abaixo da faixa de rodagem; interceptar a água que flui na direção da pista; e conduzir a água que atravessa a pista de forma controlada. As três primeiras funções são realizadas por drenagem longitudinal, enquanto a quarta função requer estruturas de drenagem de transposição, tais como galerias, bueiros e pontes (HALD et al., 2004; HEINRICH, 1985).

O projeto hidráulico da drenagem longitudinal é normalmente baseado em cálculos a partir de chuvas locais nas proximidades da estrada e de áreas mais distantes. O projeto de estruturas de drenagem envolve considerar os custos de manutenção da estrada e o risco de ocorrer *versus* o custo de construção do sistema de drenagem e a proteção contra a erosão. A drenagem pode representar uma proporção significativa dos custos totais de construção de estradas. No entanto, ela tem um impacto substancial no desempenho da estrada ao longo de sua vida útil (DELLEUR, 2002; HALD et al., 2004).

A superfície da estrada deve ser construída com uma inclinação ou curvatura suficiente para escoar rapidamente a água da chuva (Figura 9). Pavimentos mais largos aumentam a área de captação, conseqüentemente, uma maior quantidade de água que deve ser escoada. Em trechos tangentes e em curvas horizontais com raios grandes (Quadro 5), as águas naturais são conduzidas para fora da pista, devido ao abaulamento, mesmo se a declividade longitudinal for muito pequena

(BRASIL, 1999b; DELLEUR, 2002; HALD et al., 2004; LEE, 2005; PONTES FILHO, 1998; SUZUKI; AZEVEDO; JÚNIOR, 2013).



Fonte: adaptado de Suzuki, Azevedo e Júnior (2013, p. 47).

Quadro 5. Raios que dispensam a superelevação

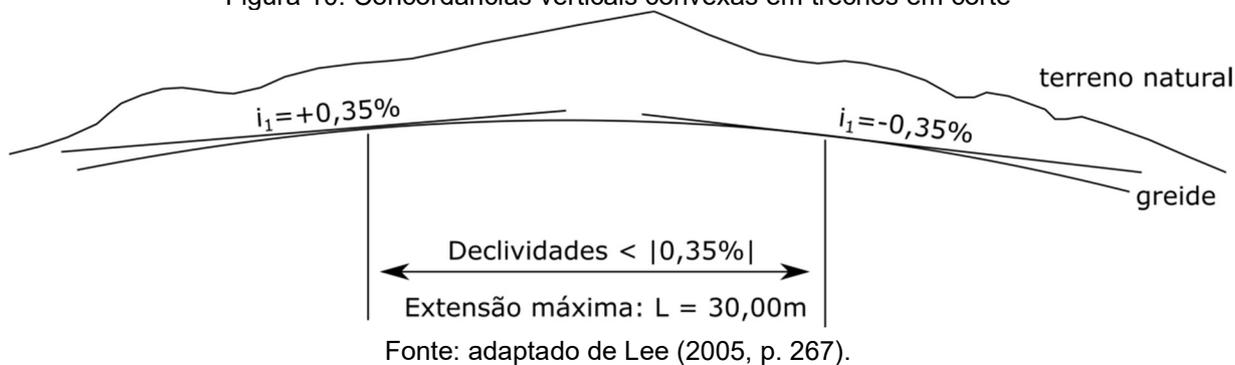
Velocidade (km/hora)	Raio (metros)
30	450
40	800
50	1.250
60	1.800
70	2.450
80	3.200
90	4.050
≥100	5.000

Fonte: adaptado de Brasil (1999b, p. 97).

Nos trechos de curvas horizontais com raios inferiores aos referenciados (Quadro 5), será necessário à aplicação da superelevação para garantir o escoamento da água para o lado interno da curva. Em sarjetas, para possibilitar o escoamento suficiente é recomendável que a declividade longitudinal seja igual ou superior a 1%. Em locais em que a declividade longitudinal se aproxima de zero, a profundidade dos drenos laterais deve ser variada para obter o escoamento necessário, mantendo-se a declividade longitudinal acima do mínimo de 0,5% e observando o mínimo absoluto de 0,35% (DELLEUR, 2002; HALD et al., 2004; LEE, 2005).

Mantendo essas características mínimas, mesmo em locais com declividade nula, ou mesmo negativa, o greide apresentará no entorno da curva, para ambos os lados, declividades inferiores ao mínimo absoluto (Figura 10), quando seguidas às normas do DNIT, desde que, limitado a uma extensão de 30 metros.

Figura 10. Concordâncias verticais convexas em trechos em corte



Assim, é importante investigar as combinações de valores de declividades longitudinais e transversais para identificar possíveis extensões da estrada que irão apresentar declividade com potencial problema no escoamento das águas superficiais. Ao identificar tais locais, deve-se alterar a configuração do greide, de modo a dotá-lo da declividade mínima desejável. Em manuais de estradas, geralmente são disponibilizados diagramas de declividade que facilitam o trabalho de identificação de tais áreas (BRASIL, 1999b; LEE, 2005).

### 2.3 ESTRADAS FLORESTAIS

As estradas têm um papel importante ao beneficiarem economicamente e socialmente as comunidades que dela fazem parte. Em estradas florestais, isso não é diferente, contribuindo para o desenvolvimento do setor e para o acesso da comunidade a mercados, serviços, como educação e saúde, lazer, empregos e informações disponíveis nas cidades. Contudo, para garantir a continuidade desses benefícios, há a necessidade de manutenção e ampliação destas infraestruturas (MACHADO, 2013).

Como as estradas florestais possuem propósitos muito específicos, geralmente são dotadas de três características: volume de tráfego baixo; caminhões longos e pesados e caminhões carregados trafegando sempre na mesma direção. Geralmente as estradas de acesso e principais terão um fluxo maior e as estradas secundárias um fluxo mais baixo. Em florestas plantadas o tráfego geralmente é sazonal e em florestas nativas o tráfego pode ter curta duração em função do ciclo

de corte que leva a empresa florestal a mudar de área na exploração a cada ano (BRAZ et al., 1998; MACHADO, 2013; REIS et al., 2013; SESSIONS et al., 2007).

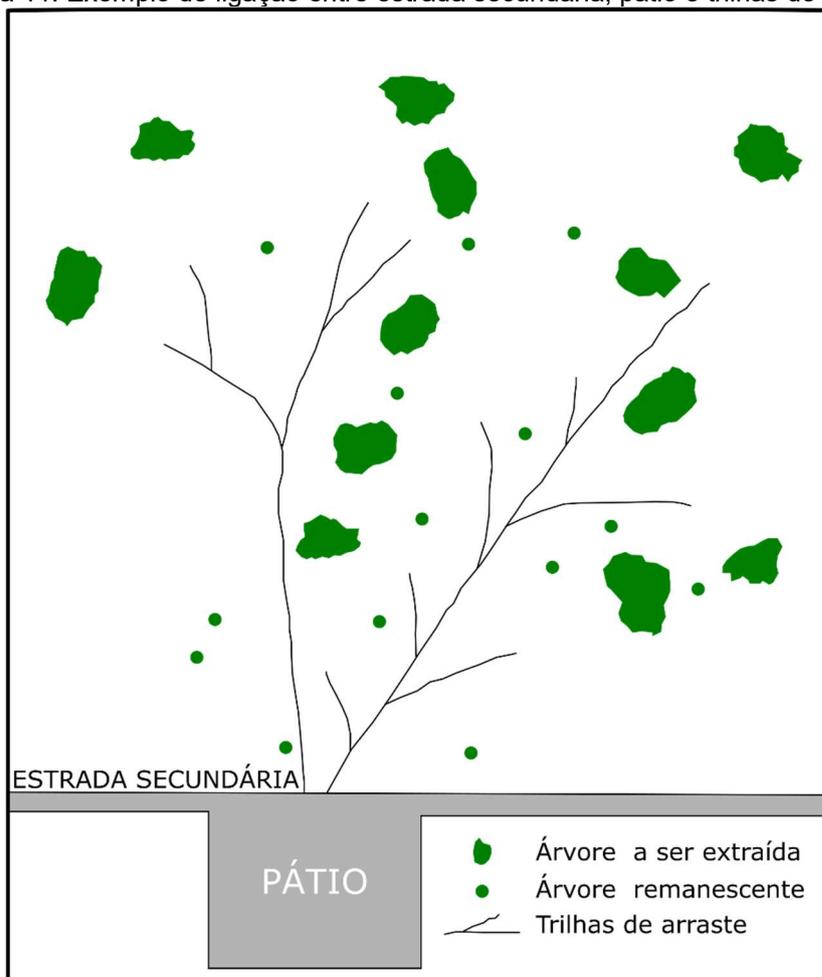
Apesar da aparente simplicidade na construção de estradas sem pavimentação, mais comuns em área florestal, tais infraestruturas requerem um planejamento complexo que envolve a instalação de bueiros, pontes e outras estruturas de passagem, bem como a conservação da floresta minimizando os impactos ambientais provocados por abertura de áreas, fragmentação e outros (SESSIONS et al., 2007).

Além disso, em florestas tropicais a construção de estradas envolve problemas adicionais por vários fatores, como: Períodos prolongados de chuva intensa, presença de brejos, presença de áreas de preservação permanente, de árvores protegidas por lei e a colheita em sistema policíclico, comumente adotado em manejo de baixo impacto, pode resultar em baixa receita, limitando assim os investimentos em estradas. Por outro lado, a própria floresta oferece madeira de qualidade que pode ser aproveitada, por exemplo, na construção de pontes (SESSIONS et al., 2007).

Embora a construção de estradas, comumente esteja associada à exploração de produtos florestais, é importante destacar que também fornecem acesso para fins de gerenciamento, desenvolvimento, conservação e proteção (SESSIONS et al., 2007). A definição e construção das estradas florestais são consideradas as primeiras atividades das operações de colheita e transporte de produtos. Para a indústria madeireira, além de permitir acesso à área florestal para a colheita e o escoamento dos produtos, as estradas facilitam também a realização do planejamento e manejo, o combate a incêndios e o transporte de máquinas, materiais e pessoas (ESPADA et al., 2013; MACHADO, 2013; PICCHIO et al., 2018).

As estradas florestais são classificadas, como: Estradas de acesso, que são ligações permanentes entre florestas e vias públicas, estradas principais, que formam uma rede permanente de estradas na floresta, estradas secundárias, que permitem a conexão dos pátios de estocagem até as estradas principais, trilhas de arraste primárias e secundárias que permitem o acesso de máquinas na floresta para o transporte de toras até a estrada secundária e pátios de estocagem (Figura 11) (ESPADA et al., 2013; SESSIONS et al., 2007).

Figura 11. Exemplo de ligação entre estrada secundária, pátio e trilhas de arraste



Fonte: Adaptado de AMARAL et al. (1998, p. 59).

As estradas também podem ser denominadas pelo meio do transporte utilizado, por exemplo: estrada de caminhões, estrada de tratores, entre outras. Uma estrada em um terreno montanhoso pode ser denominada como estrada de vale, estrada de encosta ou montanha. O tipo de construção também é um referencial para a denominação, como: Estrada de terra, estrada de cascalho ou estrada pavimentada (SESSIONS et al., 2007).

Ao construir estradas florestais, deve haver a preocupação por parte do gestor, em atender aspectos sociais e técnicos, garantindo o melhor traçado com o menor custo de implantação e manutenção, reduzindo assim os impactos ambientais. Para isso, é fundamental o planejamento adequado e fundamentado em informações de boa qualidade.

## 2.4 PLANEJAMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS

Tendo em vista os diversos impactos provenientes da construção de estradas, sejam eles positivos ou negativos, é de suma importância que o planejamento seja

conduzido de modo a observar, não somente os objetivos da empresa de colheita e transporte, mas também os aspectos ambientais, como: A biodiversidade, a malha hídrica, a manutenção de árvores porta-sementes, as áreas de preservação permanente, a paisagem, entre outros.

Em florestas naturais, o impacto ambiental tem uma especial importância, desta forma, o planejamento deve considerar também o menor movimento de terra possível e a minimização de impacto no solo (AMARAL et al., 1998; BRAZ et al., 1998). Além disso, o gestor florestal deve ter em mente que a qualidade da via afeta diretamente os custos com a manutenção dos veículos, os índices de acidentes e os níveis de impacto ambiental.

#### **2.4.1 Fases do planejamento**

Assim como em outras áreas, o planejamento destinado às estradas pode ser dividido, de forma geral, em macroplanejamento e microplanejamento. O macroplanejamento envolve pensar as estradas considerando as necessidades relativas do acesso ao povoamento para colheita, transporte, combate a incêndios, entre outros aspectos que variam de acordo com o tipo de floresta e se a mesma é plantada ou nativa. Neste momento o gestor deve considerar a otimização da densidade das estradas e o traçado geométrico.

O microplanejamento está associado à gestão que é realizada no nível operacional, ou seja, considerará aspectos da construção das estradas e pátios associados ao plantio ou colheita, por exemplo, escalonando os investimentos para as áreas que estão previstas nas primeiras atividades de manejo. Além disso, nesta fase são identificados os pontos críticos e planejadas as medidas mitigatórias aos impactos ambientais (MACHADO, 2013; SILVA et al., 2018a).

#### **2.4.2 Métodos de planejamento**

Conforme Machado (2013) há basicamente quatro métodos de planejamento: o tradicional em que o engenheiro florestal se apoia em normas técnicas, experiência e nas características geomorfológicas locais; o método econômico em que são consideradas análises econômicas; o método otimizado que faz uso de técnicas de pesquisa operacional para obter as características ótimas do plano; e por fim, o integrado que combina os três métodos anteriores.

O planejamento integrado pode ser subdividido em três fases; o projeto conceitual; o anteprojeto e o projeto. O projeto conceitual é iniciado na fase de macroplanejamento e considera o alcance do projeto e a identificação de informações de fatores ambientais. O anteprojeto envolve um planejamento mais tático, em que são especificados os objetivos e são analisadas, avaliadas e quantificadas as alternativas viáveis.

Na fase de projeto, questões mais técnicas são definidas, como: Aspectos geométricos, geotécnicos, de drenagem, restrições técnicas, econômicas e ambientais (MACHADO, 2013). Além das questões técnicas e econômicas, é importante observar também os aspectos ambientais e sociais ao planejar estradas em florestas, especialmente em florestas naturais.

### **2.4.3 Aspectos técnicos**

Durante o planejamento da construção de estradas deve ser feito um levantamento acerca da área que receberá a nova infraestrutura. Minimamente o levantamento deve incluir informações, como: Tamanho da área, informações da hidrologia local, informações geológicas e geotécnicas, topográficas, informações do solo, clima, trafegabilidade, rede viária existente e recursos financeiros disponíveis (MACHADO, 2013).

O levantamento possibilitará ao gestor projetar a estrada atendendo aos requisitos que permitirão um tráfego seguro minimizando os custos e impactos ambientais. Para isso será necessário avaliar o relevo local projetar o traçado e a drenagem das vias.

#### **2.4.3.1 Relevo**

A melhor ligação entre dois pontos é uma reta, mas nem sempre é viável, do ponto de vista econômico, ambiental ou físico. Em grande parte das vezes, o relevo influencia nestes dois aspectos e com isso surge a necessidade de caminhos alternativos para viabilizar o projeto (PONTES FILHO, 1998). Além disso, é importante destacar que em florestas nativas é de suma importância que as estradas sejam planejadas considerando a topografia do terreno, para evitar ao máximo a aplicação de cortes e aterros (DYKSTRA; HEINRICH, 1996; SIST, 2000), o que torna o relevo uma importante fonte de dados.

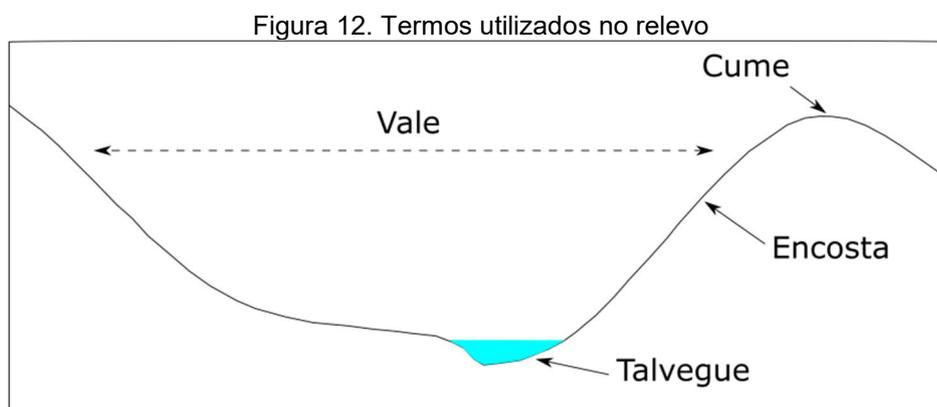
No que diz respeito ao relevo, há basicamente três tipos de região: plana, ondulada e montanhosa. Quanto mais suave for à topografia da região, menor será

o custo de construção de estradas. Terrenos com greide de até 30% são considerados planos ou ondulados, já os que apresentam greide entre 30 e 60%, considera-se como terreno montanhoso, por fim, terrenos com greide acima de 60% são considerados íngremes (MACHADO, 2013; SEDLAK, 1985).

Em terrenos planos e ondulados, as características gerais são: construção simples de estradas; nenhuma ou pouca ocorrência de rochas e pequenos danos ao meio ambiente. Em terrenos montanhosos as características predominantes são: construção difícil de estradas; maior grau de subida com mais rochas e danos. Por fim, em gradiente superior a 70%, é necessária uma avaliação da viabilidade da construção da estrada considerando inclusive a produtividade da área (FATEHI et al., 2017; SEDLAK, 1985).

Ao considerar as orientações e técnicas de EIR, em regiões com o greide do terreno superior a 17° não se deve aplicar o arraste de toras devido aos extensos danos que serão causados ao solo e à vegetação, a menos que as árvores possam ser guinchadas ou arrastadas de uma posição sem a necessidade de o trator descer a encosta. Contudo, nestas áreas podem ser aplicadas técnicas alternativas como o guincho aéreo. Áreas com inclinação superior a 45° devem ser excluídas da exploração e identificadas como áreas protegidas (BRASIL, 2012; DYKSTRA; HEINRICH, 1996; EZZATI et al., 2015; PINARD et al., 1995; SIST, 2000).

No que diz respeito ao *layout* de estradas em terrenos planos, é possível planejar o traçado com maior uniformidade. Contudo, o traçado ainda será influenciado por características locais, como áreas de preservação permanente; árvores protegidas por lei e malha hidrográfica. Em terrenos ondulados ou montanhosos é comum se encontrar as seguintes situações: vale; encosta e cume (Figura 12) (MACHADO, 2013; SEDLAK, 1985).

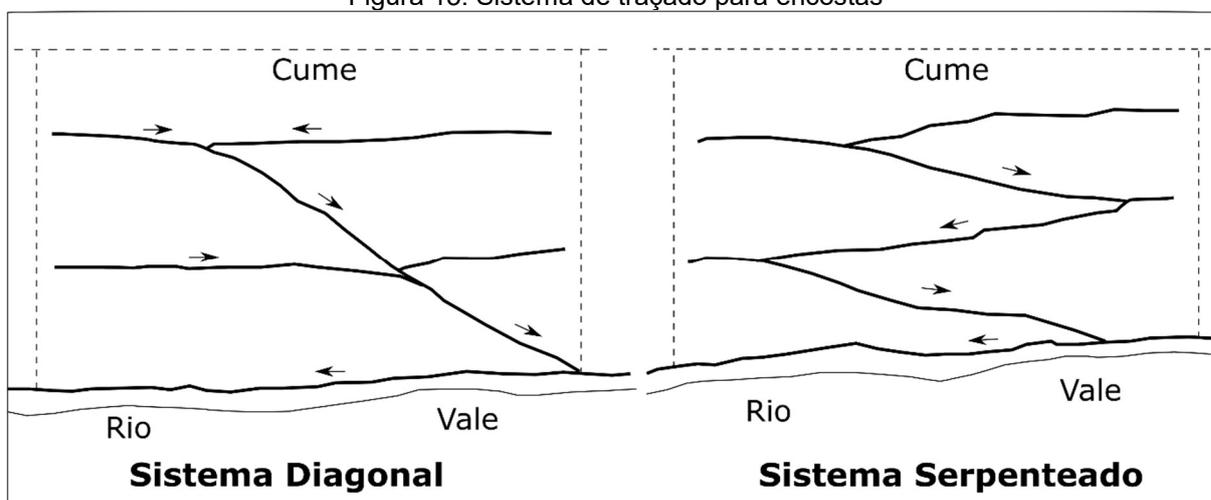


Fonte: O autor.

Em áreas de vale o ideal é construir a estrada principal no vale e a partir dessa estrada são construídas as demais estradas que dão acesso às encostas, que por sua vez, podem ser íngremes ou suaves. Em encostas íngremes a estrada deve ser construída no sentido oposto ao do transporte, pois assim terão greide suave. (BOWMAN; HESSLER, 1983; MACHADO, 2013; SEDLAK, 1985).

As encostas podem ser suaves ou íngremes e isso determinará se o sistema adotado será diagonal ou serpenteado (Figura 13). Em cumes, geralmente se adota estradas circulares para acessar os topos das montanhas e colinas (MACHADO, 2013; SEDLAK, 1985).

Figura 13. Sistema de traçado para encostas



Fonte: adaptado Sedlak (1985, p. 26-27).

Após avaliar o relevo local, será possível definir as áreas impróprias para exploração e definir qual o *layout* que melhor se aplica ao relevo predominante da região. De posse dessas informações é possível avançar para o planejamento do projeto geométrico.

#### 2.4.3.2 Projeto geométrico

Ao projetar estradas florestais devem ser considerados os mesmos aspectos já mencionados para o planejamento de estradas, como: O traçado, o perfil horizontal, o vertical e o transversal. Contudo, há algumas características específicas que são adotadas em estradas florestais, como por exemplo, a largura da estrada e a velocidade de tráfego. Sessions et al. (2007, p. 12) apresenta valores comumente adotados em projeto geométrico de estrada florestal (Quadro 6) considerando o tipo de estrada.

Quadro 6. Características comumente adotadas para estradas florestais

Tipo de estrada	Tipo de uso	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Acesso	Caminhão	9-12	7-10	50	6	Acima de 50	50-60	10-15
Principal	Caminhão	8-10	6-8	30	8	Abaixo de 50	25-40	7-10
Secundária	Caminhão	6-8	5-6	20	10	Abaixo de 6	15-25	1-7
Arraste	Trator	-	3,5-4,5	-	-	-	-	0.05-1

Fonte: adaptado de SESSIONS et al. (2007, p. 12).

Em que: 1 = Largura da estrada (m); 2 = Largura do caminho (m); 3 = Raio mínimo da Curva (m); 4 = Gradiente máximo (%); 5 = Carregamentos de caminhão por dia; 6 = Velocidade de tráfego (km/h); 7 = Custo estimado por metro de estrada (USD\$).

Para estradas não pavimentadas, caso típico encontrado em estradas florestais, é natural que a velocidade praticada seja inferior à velocidade aplicada em rodovia pavimentada e sinalizada. Machado (2013) descreve a velocidade diretriz máxima recomendada, como: 60 a 80km/h em relevo plano, 40 a 60km/h em relevo ondulado e 30 a 40km/h em relevo montanhoso. Em florestas, além da inexistência de pavimentação, é comum que as estradas tenham limitações adicionais, como exemplo, as estradas secundárias geralmente são estreitas e dessa forma, só é possível o tráfego em um sentido apenas.

Considerando as características particulares de estradas florestais, autores da área disponibilizam valores de referência para serem aplicados especificamente neste tipo de projeto. Por exemplo, valores de raio mínimo de curva, podem ser obtidos em Sessions et al. (2007) conforme o Quadro 7, e valores de coeficiente de atrito lateral específicos para estradas rurais podem ser obtidos em Brasil (1999b) conforme o Quadro 8.

Quadro 7. Raio mínimo considerando várias velocidades

Velocidade (km/h)	Velocidade (m/s)	Raio mínimo (m)
30	8,33	47
40	11,1	84
50	13,9	131
60	16,7	189
70	19,4	257
80	22,2	336

Fonte: adaptado de SESSIONS et al. (2007, p. 15).

Quadro 8. Valores máximos admissíveis de coeficientes de atrito lateral em estradas rurais

Velocidade diretriz (km/h)	Coeficiente de atrito lateral
30	0,20
40	0,18
50	0,16
60	0,15
70	0,15
80	0,14
90	0,14
100	0,13
110	0,12
120	0,11

Fonte: adaptado de Brasil (1999b, p. 71).

Há uma relação direta do perfil vertical de estradas com a topografia do terreno. Em estradas não pavimentadas tem-se o objetivo de que o projeto geométrico acompanhe a topografia local, pois a movimentação de terra realizada com cortes ou aterros é um dos itens mais onerosos da construção de estradas e tem alto grau de impacto ambiental (MACHADO, 2013; SENÇO, 2007; SESSIONS et al., 2007).

Neste projeto, deve-se considerar também um eficiente sistema de escoamento de água, a fim de evitar erosão na pista, para isso, deve-se definir um greide mínimo. Por fim, deve-se considerar o greide máximo é influenciado pelas características dos veículos que irão trafegar na via (MACHADO, 2013; SESSIONS et al., 2007). Considerando que em estradas florestais é comum o trânsito de caminhões, Sessions et al. (2007) disponibiliza valores de referência para o greide máximo de acordo com o tipo de terreno e a velocidade diretriz (Quadro 9).

Quadro 9. Greide máximo para caminhões em diferentes velocidades e topografias

Velocidade (km/h)	Terrenos ondulados (%)	Terrenos montanhosos (%)
30	11	16
40	11	15
50	10	14
60	10	13
70	9	12
80	8	10

Fonte: adaptado Sessions (2007, p. 18).

Além do projeto geométrico, o projeto de estradas florestais também deve levar em consideração à drenagem da via para minimizar os danos, tanto à estrada, quanto à floresta remanescente. Novamente, há características específicas que devem ser observadas.

### 2.4.3.3 Drenagem

As estradas florestais devem ser projetadas e construídas de forma a causar o mínimo de mudanças nos padrões de drenagem natural (WEAVER; HAGANS, 1994). Para dimensionar a drenagem, é importante considerar informações climáticas da região, tipo de solo predominante, vegetação entre outros. Machado (2013) destaca que as estradas florestais têm a resistência a deformação física reduzida em períodos chuvosos. Assim, o sistema de drenagem deve ser dimensionado considerando a vazão esperada, a capacidade erosiva da instalação utilizada para o escoamento e o tipo de material dos drenos.

A drenagem em estradas não pavimentadas divide-se em três tipos: superficial, de transposição de talvegue e subterrânea. A drenagem superficial refere-se ao escoamento das águas que são direcionadas para a estrada e que não sofreram evaporação, transpiração ou infiltração. A drenagem superficial é a mais comumente aplicada em estradas florestais. Geralmente são utilizados dispositivos, como: Abaulamento, sarjetas, saídas d'água, valetas de proteção; valetas de condução de água (ou degraus), valetas de pé-de-aterro, valetas de derivação, bueiros de greide e bacias de acumulação (DYKSTRA; HEINRICH, 1996; HEINRICH, 1985; MACHADO, 2013; SEDLAK, 1985; SESSIONS et al., 2007; SUZUKI; AZEVEDO; JÚNIOR, 2013).

Em estradas florestais, o dispositivo comumente utilizado para a drenagem superficial é a sarjeta, cujo tipo mais comum é a triangular, devido a sua boa capacidade de vazão e a facilidade de construção com a motoniveladora. Além disso, deve-se combinar o uso da sarjeta com a saída d'água, que permitirá conduzir a água coletada pela sarjeta para fora da estrada. A água escoada pela drenagem superficial deve ser direcionada adequadamente para evitar erosão na estrada e nas adjacências. Neste caso, são utilizados escoadouros naturais, artificiais e bacias de acumulação (MACHADO, 2013; SEDLAK, 1985; WEAVER; HAGANS, 1994).

A drenagem de transposição de talvegue é utilizada caso seja necessário que a estrada atravesse águas provenientes de uma bacia sem comprometer a sua estrutura. Para isso, podem ser instalados bueiros ou a construção de pontilhões ou pontes transpondo o curso d'água. Por fim, a drenagem subterrânea tem o objetivo de captar as águas que possam atingir o subleito e rebaixar o lençol freático para que não haja comprometimento do desempenho estrutural da estrada provocado pela umidade contida próximo à superfície da estrada ou em suas camadas

estruturais. Embora possa ser útil em casos específicos, este tipo de drenagem não é utilizado em estrada florestal (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; HEINRICH, 1985; MACHADO, 2013).

Devido à compactação do solo, as estradas têm uma baixa permeabilidade, ainda assim, a capacidade do solo na infiltração é um importante fator na consideração do dimensionamento das instalações de drenagem, pois as águas direcionadas para o leito da estrada são provenientes de chuva, encostas e taludes. Dependendo do tipo de solo, boa parte dessa água pode ser retida antes de chegar à estrada (MACHADO, 2013; SUZUKI; AZEVEDO; JÚNIOR, 2013). Valores típicos para a capacidade de permeabilidade do solo são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10. Níveis de permeabilidade do solo

Permeabilidade	Tipo de Solo
Alta	Pedregulhos
Alta	Areia grossa
Alta para Média	Areia média
Média	Areia fina
Média para baixa	Silte
Baixa	Argila

Fonte: Adaptado de Sessions et al. (2007, p. 75).

As técnicas de EIR recomendam que após o arraste das toras pelas trilhas, devem ser construídas estruturas de dreno transversal, para que as águas, que escoarem longitudinalmente tenham seu fluxo interrompido. Esta medida visa reduzir a erosão do solo (SEDLAK, 1985). Os drenos devem ser construídos em ângulos de 60° a 80°, medidos a partir do eixo longitudinal. A frequência com que os drenos devem ser instalados aumenta de acordo com a inclinação do terreno (PINARD et al., 1995; SIST, 2000). O Quadro 11 apresenta uma referência para adoção ao determinar a frequência mínima entre os drenos.

Quadro 11. Frequência mínima de dreno para estradas e trilhas de arraste

Inclinação (%) na trilha de arraste	Espaçamento entre drenos
< 10	Não é necessário dreno
10 – 20	30 m
20 – 30	20 m
Inclinação (%) na estrada	Espaçamento entre drenos
< 5	Não é necessário o dreno
5 – 15	120 m
15 – 20	80 m

Fonte: Adaptado de Sist (2000, p. 7).

A aplicação de drenos nas laterais da pista e drenos transversais são em geral práticas simples e baratas, essenciais para a minimização da erosão do solo associada às estradas, mas, muitas vezes negligenciadas em estradas florestais. Embora, tais recursos muitas vezes se pagam apenas pela redução nos custos de

manutenção de estradas, ou na redução das perdas com atrasos associados ao transporte da madeira (DYKSTRA; HEINRICH, 1996).

Assim, um projeto de estrada florestal deve considerar no mínimo estes três aspectos técnicos abordados: relevo local; projeto geométrico que inclui o traçado, o perfil horizontal, vertical e transversal; e a drenagem das vias. Os aspectos técnicos do projeto geralmente são considerados no âmbito da gestão operacional. Já os aspectos econômicos, fundamentais para a saúde financeira do projeto de estradas, são geralmente tratados nos níveis tático e estratégico.

#### **2.4.4 Aspectos econômicos**

As operações florestais são diretamente influenciadas pela rede de estradas utilizada nas variadas atividades, como: Colheita, tratamentos, arraste, transporte e outros. O planejamento da construção e manutenção das estradas deve estar compreendido no planejamento estratégico da empresa, visto que este impacta diretamente no desempenho geral do empreendimento florestal. A qualidade das estradas, por exemplo, afeta o tempo de transporte, a manutenção dos veículos, os acidentes de trânsito e outros (MACHADO, 2013).

Além disso, para determinar o alinhamento e a densidade mais econômica da estrada, é necessário calcular o custo dos veículos e o custo das próprias estradas. O projeto ideal é aquele que minimiza a combinação de custos de exploração florestal, transporte, construção e manutenção, proporcionando uma operação segura e controlando os impactos ambientais (SESSIONS et al., 2007).

##### **2.4.4.1 Determinação do custo dos caminhões**

O custo operacional de um caminhão é a soma de vários componentes: depreciação, juros sobre o investimento, seguro, taxas e impostos, mão-de-obra, combustível, óleo e lubrificantes, manutenções e pneus. Geralmente, o ideal é que os custos do caminhão sejam calculados considerando as horas trabalhadas e ociosas. Mas, para comparação de caminhos alternativos de estrada, é mais apropriado considerar apenas as horas trabalhadas (SESSIONS et al., 2007). Pois, os demais fatores não são sensíveis a diferentes alternativas de trajeto.

O tempo de deslocamento do caminhão é afetado pelo alinhamento vertical e horizontal, pela carga bruta do veículo, pelo volume do tráfego, pelas condições da pavimentação da estrada, pelo treinamento do operador e pelas condições climáticas. Os tempos de viagem dos caminhões ao longo de uma estrada podem

ser obtidos de dados de observação local ou por modelos matemáticos (SESSIONS et al., 2007).

#### 2.4.4.2 Determinar o custo de construção e manutenção de estradas

A construção e manutenção de estradas estão entre os itens de maior custo dentre as atividades de manejo florestal. Além disso, entendê-los é importante para avaliar as estratégias de transporte, como: Alternativas de localização de estradas, equilíbrio entre custos de colheita e custos de transporte, escolhas de padrões rodoviários, escolha do modo de transporte, seleção de áreas considerando o período seco ou chuvoso e análise de viabilidade ao realizar a contratação de projeto de estrada (AKAY, 2006; EPSTEIN et al., 2006; SESSIONS et al., 2007).

Os custos de construção e manutenção de estradas são geralmente calculados usando um método simples. Inicialmente, estima-se a quantidade necessária para cada elemento rodoviário, como o estaqueamento, a limpeza, a terraplanagem, o reforço e o nivelamento do subleito, a pavimentação e as estruturas de drenagem. Em seguida, as quantidades estimadas são multiplicadas pelos custos unitários de cada elemento, com isso pode-se obter o custo por quilômetro de estrada construída (AKAY, 2006; SESSIONS et al., 2007).

Em florestas nativas, frequentemente as árvores comerciais são extraídas e as estradas abandonadas. Pois, uma considerável parte das estradas é utilizada por um curto período de tempo, por vezes, apenas por um ciclo de corte e após isso não são realizadas manutenções nas estradas. A produção florestal é baixa, em muitos casos em torno de 10 a 20 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> (SFB, 2011) e o tráfego de veículos não é intenso. Assim, é comum realizar manutenções apenas em estradas de acesso e primárias (FAO, 1974).

Contudo, um planejamento adequado deve ser feito pelo gestor a fim de otimizar o uso das estradas e minimizar o impacto ambiental. Deve-se buscar um equilíbrio na abertura de estradas, pois uma rede muito densa impactará o povoamento e incorrerá em maiores custos de construção. Por outro lado, uma rede pouco densa implicará em arraste excessivo, que também trará danos ao povoamento e implicará em excesso de custos de transporte (AKAY, 2006; BRAZ et al, 1998). Desta forma, a estimativa da densidade ótima de estradas é uma importante ferramenta no planejamento do gestor florestal.

#### 2.4.4.3 Densidade ótima de estradas florestais

Parte do planejamento da construção de estradas florestais envolve a estimação da densidade ótima de estradas (DOE). A DOE é uma técnica quantitativa que permite obter a condição ótima que relaciona a estrada com a colheita florestal (AMARAL et al., 1998; BOWMAN; HESSLER, 1983; DUKA et al., 2017; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; SESSIONS et al., 2007). Sabe-se que cada metro linear adicional na construção de uma estrada, envolve o aumento do custo. Assim, ao avaliar apenas este aspecto, é natural que o gestor fará o possível para reduzir a quantidade, em termos de comprimento, a ser construído de estrada em seu planejamento.

Contudo, ao reduzir a densidade de estrada, os custos de colheita aumentam, assim, a DOE permite encontrar o ponto de equilíbrio em que se obtém a economia máxima com a construção e manutenção de estradas comparando com o aumento nos custos da colheita. Desta forma, ela estabelece a relação estrada/colheita em termos técnicos e econômicos (BRAZ, 1997; MACHADO, 2013; SESSIONS et al., 2007).

A densidade de estradas (DE) refere-se ao comprimento total de estradas, expressa em termos de  $m.ha^{-1}$ , para atender a uma determinada área que deve ser abastecida (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007). Para exemplificar, uma densidade de estrada de  $30 m.ha^{-1}$  quer dizer que para cada hectare de floresta há 30 metros lineares de estradas. Por meio da Equação 5 é possível calcular a relação  $m.ha^{-1}$  (MACHADO, 2013; SESSIONS et al., 2007).

(5)

$$D = \frac{L}{A}$$

Em que: L = comprimento linear de estradas (m); A = área a ser explorada em hectares (m).

Em uma UPA de 100 ha, a relação seria:

$$D = \frac{L}{A} = \frac{3.000m}{100ha} = 30 m.ha^{-1}$$

A metodologia mais empregada na estimativa da DOE foi desenvolvida pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 1974) conforme a Equação 6:

$$DOE = \sqrt{\frac{C.T.V.q}{R}} \quad (6)$$

Em que: DOE = Densidade ótima de estradas (m.ha<sup>-1</sup>);  $C = \frac{e.t.1.000}{L}$  = custo operacional da extração (R\$.m<sup>-3</sup>); e = custo da operação de extração (R\$.minuto<sup>-1</sup>); t = tempo gasto na extração, em viagem com e sem carga, para percorrer a distância de 1 metro (minuto); L = capacidade de carga média do maquinário de extração (m<sup>3</sup>); T = fator de correção para os casos em que a extração não é realizada em linha reta e perpendicular à estrada e não termina no ponto mais próximo ao de origem variando entre 1 e 1,5; V = fator de correção quando as estradas não são paralelas e são tortuosas com separações desiguais entre si e varia entre 1 e 2; q = volume de madeira a ser colhida (m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>); R = custo de construção e manutenção de estrada florestal (R\$.km<sup>-1</sup>).

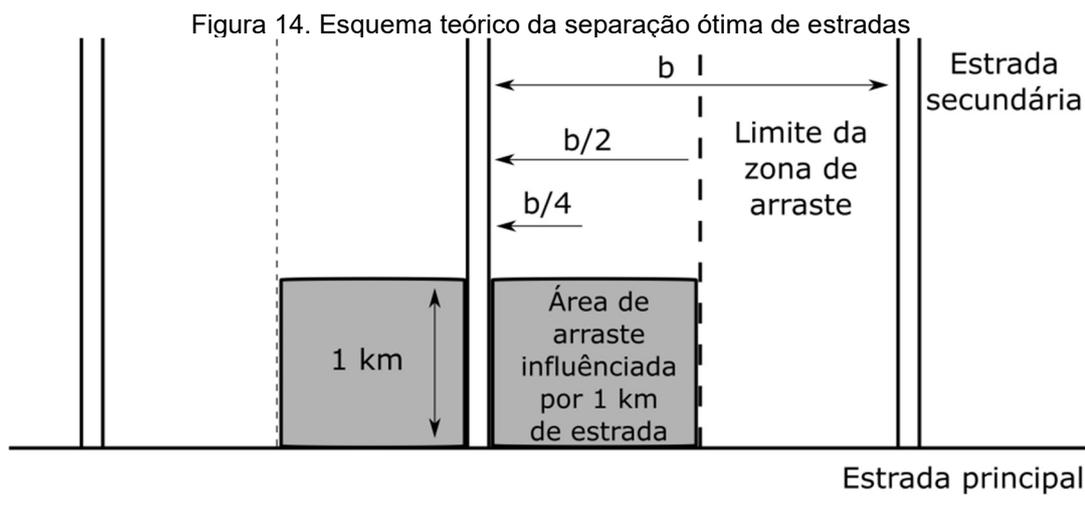
Os fatores de correção (T e V), presentes na Equação 6 são subjetivos e referem-se apenas a correção no alinhamento horizontal. Assim, na ausência de informações detalhadas, a melhor opção pode ser removê-los. Uma das limitações desta fórmula é a necessidade de se conhecer os detalhes da tipologia dos compartimentos, pois cada compartimento possui características que podem resultar em maior ou menor produtividade e, conseqüentemente, maior ou menor densidade de estradas. Por isso, é preciso calcular a DOE por compartimento ou adotar uma metodologia específica que favoreça o menor custo e o menor dano ao povoamento (BRAZ, 1997; BRAZ et al, 1998; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; SESSIONS et al., 2007).

Além desta limitação, quando o objetivo é obter uma densidade ótima para o arraste das árvores nesta metodologia, é preciso considerar apenas as áreas em que serão empregadas as trilhas na fórmula, da mesma forma, grandes áreas improdutivas devem ser excluídas (FAO, 1974). Isso se deve ao fato de que tais fórmulas são eficientes apenas quando aplicadas em áreas extensas e em condições uniformes de terreno, condição esta, que na prática, é rara. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 1974) destaca ainda que tais fórmulas não foram bem aplicadas em terrenos íngremes e irregulares.

#### 2.4.4.3.1 Separação ótima de estradas

A separação ótima entre estradas (SOE) possibilita obter a distância entre estradas, que deve ser observada ao planejar a construção das estradas

secundárias (Figura 14). Este dado permite ao gestor determinar os equipamentos de extração ideais para a distância de arraste definida. O que resultará em menores custos, tendo em vista o dimensionamento correto, por exemplo, do trator de arraste, pois, um equívoco neste planejamento pode levar a empresa a empregar equipamentos com maior custo de consumo e manutenção (BRAZ, 1997; DUKA et al., 2017; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007). A equação 7 permite calcular a estimativa da separação ótima de estradas.



Fonte: Adaptado de Figueiredo, Braz e d'Oliveira (2007, p. 132).

Em que:  $b$  = separação ótima entre os caminhos (m);  $b/2$  = máxima distância de arraste a ser considerada (m);  $b/4$  = distância média teórica de arraste (m).

$$SOE = 2 \sqrt{\frac{10 \times C}{V \times tr}} \quad (7)$$

Em que:  $SOE$  = separação ótima;  $C$  = custo de construção da estrada por km (R\$);  $V$  = volume explorável por hectare ( $m^3$ );  $tr$  = custo de arraste (do metro cúbico) por metro de picada (ida e volta) (R\$).

Uma limitação associada à determinação da  $SOE$  é o fato de que se assume a premissa da viabilidade de se implantar uma separação sistemática entre as estradas secundárias. Contudo, em área florestal, em especial nas florestas nativas, é muito comum a presença de elementos que impedem tal sistematização, como: Áreas de preservação permanente, árvores de espécies raras, porta sementes, áreas com alta densidade de árvores protegidas por lei, áreas com declividade acentuada, com baixa drenagem, entre outras questões.

Neste aspecto, Braz (1997) menciona que em áreas mais homogêneas, a fórmula para obter a separação ótima fornecerá estimativas aproximadas. Contudo, mesmo neste caso deve ser utilizada com cuidado, apenas como ponto de partida para o planejamento. Há limitações nesta sistematização devido a necessidade de permitir mudanças neste planejamento em função das diferenças entre a matemática pura e as condições práticas (FAO, 1974).

Figueiredo, Braz e d'Oliveira (2007) destacam que a tentativa de tornar a malha de estradas sistematicamente retas e paralelas é distante da realidade de florestas tropicais, podendo promover um efeito contrário ao desejado, com aumento dos custos e do impacto ambiental. Na sequência, os autores consideram então que o cálculo deve ser utilizado apenas como um indicador para o arraste mais econômico. Outros autores mencionam que adotar tal estratégia no planejamento só elevará os custos de exploração e os danos ambientais (BRAZ, 2002, 2005; PINARD et al., 1995).

#### 2.4.4.4 Avaliação econômica de estradas florestais

Antes de tratar do assunto da avaliação econômica de estradas florestais, é de suma importância discutir sobre a classificação das estradas, uma vez que essa classificação influenciará na avaliação. Na literatura é possível observar muitas classificações, mas em geral, podem ser três sistemas: o padronizado, o flexível e o codificado. O sistema padronizado geralmente traz poucas classificações e as mais comuns são: estrada principal; secundária e ramal (ou acesso) (MACHADO, 2013; SENÇO, 2007).

Por outro lado, o sistema flexível permite a construção de um número grande de classes permitindo assim que a empresa florestal possa ajustá-lo conforme sua necessidade. O sistema codificado adota o uso de símbolos para classificar as estradas conforme suas características (MACHADO, 2013).

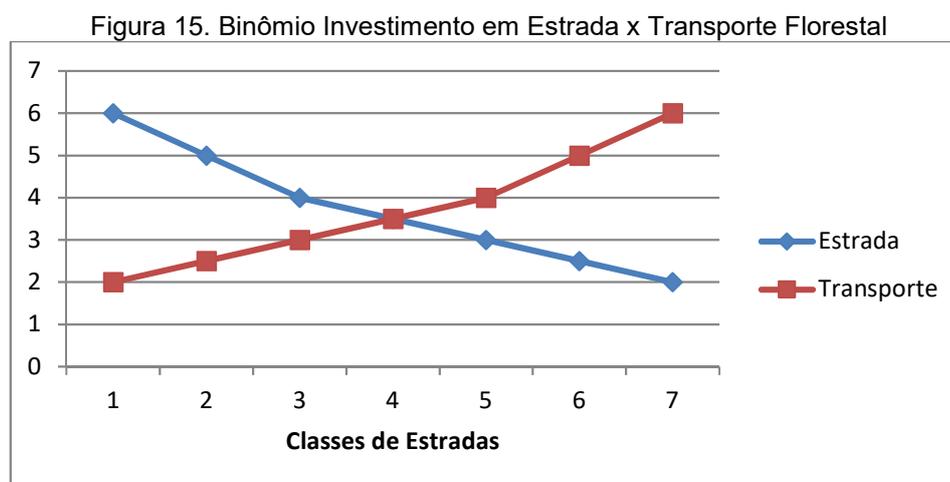
É por meio da classificação da estrada que se define a velocidade de tráfego e como os custos operacionais são calculados em uma base horária é de suma importância que a classificação permita caracterizar aspectos da estrada que vão influenciar neste cálculo. A relação é: quanto menor o tempo de tráfego seguro, menores serão os custos com transporte (MACHADO, 2013; SENÇO, 2007).

Neste aspecto, o SIBRACEF (Sistema Brasileiro de Classificação de Estradas Florestais) estabelece um padrão para o Brasil que define a classificação por meio

dos parâmetros: geometria horizontal; geometria vertical; largura e superfície da pista de rolamento (MACHADO, 1989) tendo em vista que estes são os fatores que mais afetam o desempenho de veículos (MACHADO, 2013).

Machado (2013) salienta que do ponto de vista econômico, a escolha de greides mais acentuados pode trazer uma economia de investimento em um primeiro momento, mas pode elevar os custos de transporte e manutenção. Figueiredo, Braz e d'Oliveira (2007) destacam a importância de se considerar o greide como variável de entrada no planejamento de estradas em floresta nativa.

Outro aspecto que afeta o desempenho dos veículos e, conseqüentemente, os custos de transporte é a qualidade das estradas. Essa relação pode ser observada na Figura 15 em que, para classes em que houve um maior investimento, os custos de transporte são menores. Por outro lado, ocorre o contrário quando há menos investimentos em estradas. Há também um ponto de equilíbrio entre os custos de transporte e investimentos, que na Figura 15 é representado pela classe 4. O ponto de equilíbrio é a relação ideal entre investimentos e custos.



Fonte: Adaptado de Machado (2013, p. 425).

Para realizar a avaliação econômica de investimentos em projetos de estradas, há vários métodos que basicamente podem ser divididos em: práticos e analíticos. Os práticos não são recomendados, pois são imprecisos e podem conduzir à empresa florestal a decisão errada. Os métodos analíticos consideram o valor do dinheiro no tempo e por isso são mais robustos e consistentes (MACHADO, 2013).

Alguns exemplos de métodos práticos são: tempo de retorno do capital (TRC); razão receita/custo e a razão receita média/custo. E como métodos analíticos, pode-se citar: valor presente líquido (VPL); a taxa interna de retorno (TIR); o custo médio

de produção (CMP) e o valor esperado da terra (VET) (MACHADO, 2013; SESSIONS et al., 2007).

Ao fazer um bom planejamento econômico e técnico da construção e manutenção das estradas florestais, conseqüentemente serão colhidos benefícios que irão reduzir os impactos ambientais na floresta, por exemplo, ao construir as estradas seguindo o planejamento da densidade ótima, haverá uma redução no arraste de tora, e com isso, menos danos no solo e na vegetação remanescente. Contudo, é importante que o gestor observe os aspectos ambientais associados à exploração para garantir que todos sejam considerados e assim minimizar ao máximo os danos à floresta.

#### **2.4.5 Aspectos ambientais**

A exploração de produtos na floresta exige o emprego de atividades, como a construção de estradas, que podem causar vários impactos ao solo, à fauna e a flora (HOLMES et al., 2002). Algumas literaturas citam superficialmente danos como: A piora na qualidade do ar, o uso de áreas com solo instável, o direcionamento de poluição para a malha hídrica, erosões, danos ao povoamento, o uso de áreas de preservação e aspectos estéticos (ARIMA et al., 2008; BALIEIRO et al., 2010; BRAZ, 1997; MACHADO, 2013; RIBEIRO et al., 2017; WALKER et al., 2013).

Há também autores que detalham melhor os possíveis danos que as atividades de exploração podem causar à floresta, como: A conversão de floresta em terras para agricultura, pastagens e comunidade, a abertura excessiva de áreas, a fragmentação florestal, a redução da qualidade do habitat, pode ocorrer também à interrupção de rotas migratórias de algumas espécies, os efeitos negativos na hidrologia, a redução na qualidade de vida aquática, as mudanças de fluxos de água, entre outros danos (AMARAL et al., 1998; BRAZ et al., 1998; ESPADA et al., 2013; EWEL; CONDE, 1976; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; FFT, 2002; NOGUEIRA et al., 2010; SESSIONS et al., 2007).

Contudo, empresas do ramo florestal tem implantado com sucesso técnicas de planejamento, como inventário florestal 100%, localização precisa de árvores, de rede hidrográfica, levantamento da topografia e de APPs que tem favorecido o dimensionamento de estradas, pontes, tipo de transporte e pátios de forma a minimizar o impacto negativo de tais estruturas. Pode-se citar, por exemplo, duas atividades desenvolvidas que favorecem este planejamento, a indicação de pontos

críticos de risco ambiental e a indicação de áreas restritas para instalação de estradas e pátios (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

Além disso, o manejo florestal no Brasil deve seguir o sistema policíclico, assim, a execução das atividades segue critérios que garantam um mínimo de dano à vegetação remanescente e ao solo. Por exemplo, ao realizar a marcação do caminho que o tratorista deverá percorrer para construir a estrada, a equipe sempre busca definir a estrada o mais reto o possível. Contudo ao se deparar com obstáculos, como árvore matriz, nascente, grotas, árvore comercial ou potencialmente comercial, entre outros obstáculos, serão realizados desvios para minimizar ao máximo os danos ao ambiente (AMARAL et al., 1998; ESPADA et al., 2013; FFT, 2002).

Na atividade de abertura das estradas secundárias, o tratorista inicialmente abre o caminho com a lâmina suspensa, com o objetivo de quebrar a vegetação no caminho. Na sequência o material quebrado é empurrado para ambos os lados da estrada, só depois que é realizada a raspagem do solo, cerca de 15 cm no máximo para preservar a camada superficial. Além disso, a estrada é aberta com largura entre 4 e 6 metros com o objetivo de minimizar o dano à cobertura florestal (AMARAL et al., 1998; BOWMAN; HESSLER, 1983; FFT, 2002).

Para as trilhas de arraste, que são provisórias, são adotados critérios extras. A largura da faixa é de 4 a 5 metros, o suficiente para permitir a passagem do trator com alguma folga, além disso, ao realizar a abertura da trilha, não é permitido que o trator faça a raspagem do solo. Para o arraste do tipo mecanizado, durante a exploração, recomenda-se que seja realizado o arraste de no máximo 15 árvores em cada trilha. (AMARAL et al., 1998; FFT, 2002; PINARD et al., 1995).

Recomenda-se também que as trilhas sejam planejadas de forma a minimizar a distância de arraste até o pátio de estocagem, neste aspecto, uma medida que pode ser adotada é a abertura da trilha apenas em áreas de maior produtividade. Por fim, as trilhas não podem transpor riachos, igarapé e outros (SIST, 2000). Essas medidas pretendem reduzir o assoreamento, a compactação no solo, a quebra de mudas entre outros efeitos que podem prejudicar a regeneração da área (AMARAL et al., 1998; BRAZ, 1997; DYKSTRA; HEINRICH, 1996; PINARD et al., 1995; SILVA et al., 2018a).

Cuidados também devem ser adotados para minimizar a movimentação de terra com cortes e aterros, para isso, geralmente são escolhidos trechos retos em que a inclinação não exceda 8% e trechos curvos em que a inclinação não ultrapasse 2% (AMARAL et al., 1998; BRAZ, 2005). Braz (2005) menciona que, do ponto de vista ambiental, é fundamental que as empresas evitem a construção de estradas sobre igarapés, mas que, com o objetivo de construir estradas retas para reduzir custos e aumentar a velocidade de tráfego, esta questão vem sendo desprezada. Desta forma, é importante que ao planejar as estradas, seja respeitada a topografia do terreno e os fatores ambientais.

Medidas são tomadas para diminuir a erosão, como a realização da colheita preferencialmente no período de estiagem, a instalação de bueiros, de saídas d'água e a construção da estrada com a superelevação necessária para o escoamento. A erosão ocorre porque em estradas florestais é comum uma baixa taxa de infiltração do solo e baixa retenção pela cobertura florestal (BRAZ et al., 1998; MACHADO, 2013). Assim, devem-se construir as estradas com o devido planejamento no escoamento superficial, respeitando o relevo natural, de forma a conduzir a água para áreas externas à estrada (DYKSTRA; HEINRICH, 1996; SIST, 2000).

Outra regra ambiental que deve ser respeitada ao construir estradas é a manutenção da faixa marginal em áreas de preservação permanente, como: Cursos d'água, lagos, lagoas, nascentes, olhos d'água, encostas, restingas, manguezais e outros. O código florestal define regras claras quanto às distâncias que devem ser preservadas nos respectivos entornos dessas áreas. Tal medida visa preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o solo e assegurar o bem-estar da população local (AKAY, 2006; BRASIL, 2012).

Tão importante quanto os aspectos ambientais, são as questões sociais envolvidas na construção de estradas. Observam-se efeitos positivos e negativos, que naturalmente, trazem responsabilidade para o empreendimento florestal.

#### **2.4.6 Aspectos sociais**

As estradas são importantes impulsionadoras da economia em uma determinada região. Permitem o escoamento da produção local, beneficiam os moradores com emprego e renda, os agricultores com redução de custos, estabelecem a ligação entre polos, especialmente em florestas nativas, as estradas

forneem acesso a locais antes inacessíveis (FAO, 1974; MACHADO, 2013; SESSIONS et al., 2007).

Com a implantação de estradas florestais, as comunidades locais podem se beneficiar de várias formas. Fazendas vizinhas podem ter maior lucratividade, pois os custos de transporte serão reduzidos. O acesso da mão-de-obra a essas áreas será facilitado, reduzindo potencialmente os custos ou aumentando sua disponibilidade. Permitirão o acesso aos cuidados de saúde e às escolas, uma vez que os veículos terão maior probabilidade de atingir áreas isoladas. Em geral, a rede viária construída para o empreendimento florestal pode ser um elemento-chave no desenvolvimento econômico e social da região (SESSIONS et al., 2007).

Por outro lado, as estradas também trazem efeitos negativos para a comunidade, como: Aumento de acidentes de tráfego, poluição sonora, especulação imobiliária e geram aumento de poeira causando incomodo e problemas aos moradores locais (MACHADO, 2013). Estradas florestais também podem ser mal utilizadas, atraindo exploração ilegal de madeira, caçadores, pescadores e exploradores de produtos florestais não madeireiros, causando assim impactos negativos consideráveis sobre a floresta e o meio ambiente, bem como sobre a população local (SESSIONS et al., 2007).

Neste aspecto, as técnicas de MFS preveem atividades pós-exploratórias, que, dentre outros objetivos, incluem também medidas para a proteção da floresta, como: Prevenir e combater o fogo, colocar placas de proibição, controlar atividades de caça, de pesca, tomar medidas mitigatórias contra invasão de terras, entre outras (AMARAL et al., 1998; ESPADA et al., 2013). Colocando assim, a empresa que atua no ramo, como responsável pela floresta remanescente.

#### **2.4.7 Técnicas de planejamento de estradas florestais na Amazônia**

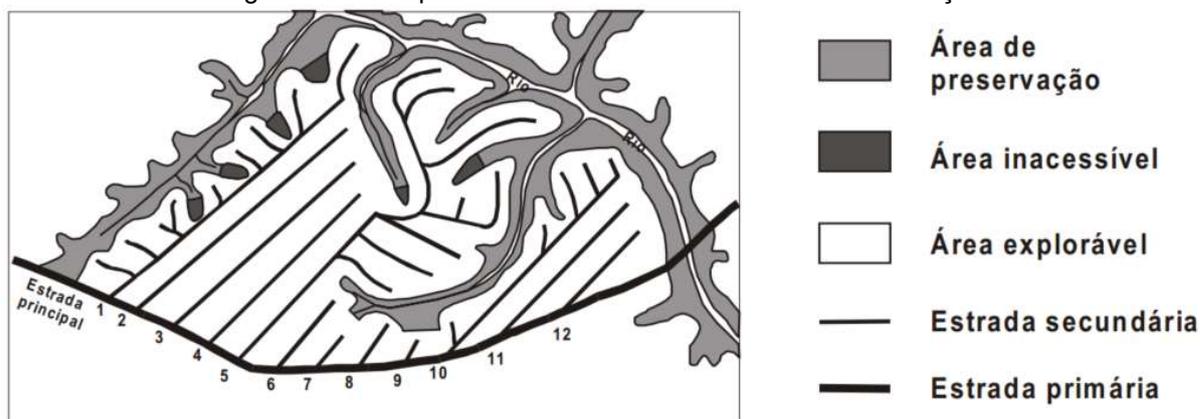
O planejamento de estradas está incluso nas atividades de infraestrutura, que envolve o planejamento de estradas, trilhas de arraste, pátios de estocagem, pontes, bueiros e outras que venham a ser necessárias. Tais infraestruturas, quando permanentes, são planejadas com antecedência suficiente que permita que sejam instaladas pelo menos um ano antes da exploração de uma determinada UPA. Além disso, tal instalação deve ser realizada preferencialmente em período de estiagem. Assim, tais medidas favorecerão a adequada compactação do solo e reduzirão o

aparecimento de buracos e poças d'água (AMARAL et al., 1998; BALIEIRO et al., 2010; DYKSTRA; HEINRICH, 1996; FFT, 2002).

#### 2.4.7.1 Estradas e trilhas de arraste

As estradas utilizadas em floresta nativa são classificadas em primárias, secundárias e trilhas de arraste. As estradas primárias geralmente são mais largas e possuem melhor acabamento, pois, são elas que ligam a área florestal a vilas e cidades e, portanto, é por meio delas que o transporte de madeira é realizado. As estradas secundárias são mais estreitas, geralmente com uma única faixa, e possuem pior acabamento. Sua função é conectar a área de exploração às estradas primárias (Figura 16) (AMARAL et al., 1998).

Figura 16. Exemplo de estradas secundárias e suas ramificações



Fonte: Adaptado de Amaral et al. (1998, p. 7).

As estradas primárias são estruturas permanentes, pois continuam sendo utilizadas para acesso a outras unidades de produção e, portanto, é comum receberem manutenção periódica. As estradas secundárias podem ser tratadas como permanentes ou provisórias, a depender do planejamento, pois, após as atividades exploratórias, é natural que sejam utilizadas apenas para atividades silviculturais de pós-colheita. Desta forma, estradas secundárias, geralmente, não recebem manutenção (ESPADA et al., 2013; SESSIONS et al., 2007).

As trilhas de arraste são infraestruturas provisórias e neste caso, o objetivo é construí-las de forma que o solo sofra o mínimo possível de compactação, para que a área possa se regenerar. Pois, não é permitido efetuar a raspagem do solo e recomenda-se que uma trilha só seja utilizada para o arraste de no máximo 15 toras (AMARAL et al., 1998; FFT, 2002).

O método tradicionalmente utilizado no projeto de infraestruturas florestais é denominado como sistemático. Neste modelo, a localização das estradas

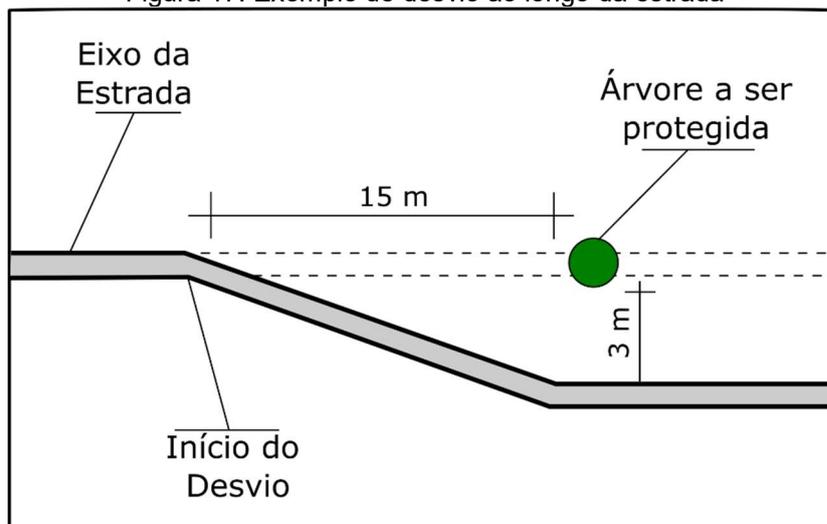
secundárias é planejada de forma equidistante entre elas, pois se acredita que isso promoverá uma melhor divisão da área para o arraste. Assim, geralmente adota-se 500 m de distância entre elas para que o arraste seja limitado a 250 m para ambos os lados (AMARAL et al., 1998; BRAZ, 1997).

Contudo, a tentativa de tornar a malha de estradas sistematicamente retas e paralelas é distante da realidade de florestas tropicais, podendo promover um efeito contrário ao desejado, com aumento dos custos e do impacto ambiental (BRAZ, 2002, 2005; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; PINARD et al., 1995). Isso ocorre porque é muito comum a presença de elementos que impedem tal sistematização, como: Áreas de preservação permanente, árvores de espécies raras, porta sementes, áreas com alta densidade de árvores protegidas por lei, áreas com declividade acentuada, com baixa drenagem, entre outras questões que devem ser consideradas em um sistema de manejo sustentável.

Outra boa prática que é considerada ao projetar as estradas secundárias é planejar a sua localização de forma que sejam posicionadas no sentido Leste-Oeste (a linha que o sol percorre) para facilitar a secagem após as chuvas (AMARAL et al. 1998; SABOGAL et al., 2006; REIS et al., 2013). Isso é importante, pois as laterais destas estradas não podem ser desmatadas e com isso, a penetração de luz solar é dificultada em florestas muito densas.

Considerando as técnicas de manejo adotadas atualmente, ao realizar a demarcação, a equipe procura o trajeto de menor resistência, em que não haja árvores de grande porte, matrizes, grotas, cursos d'água, árvores a explorar e outros obstáculos. Geralmente, utilizam-se alguns parâmetros para o desvio destes obstáculos de forma a garantir uma boa trafegabilidade (Figura 17). Todo o trecho é sinalizado para garantir que o traçado seja feito corretamente e que o trabalho seja produtivo (AMARAL et al., 1998; BRAZ, 1997; ESPADA et al., 2013; FFT, 2002).

Figura 17. Exemplo de desvio ao longo da estrada



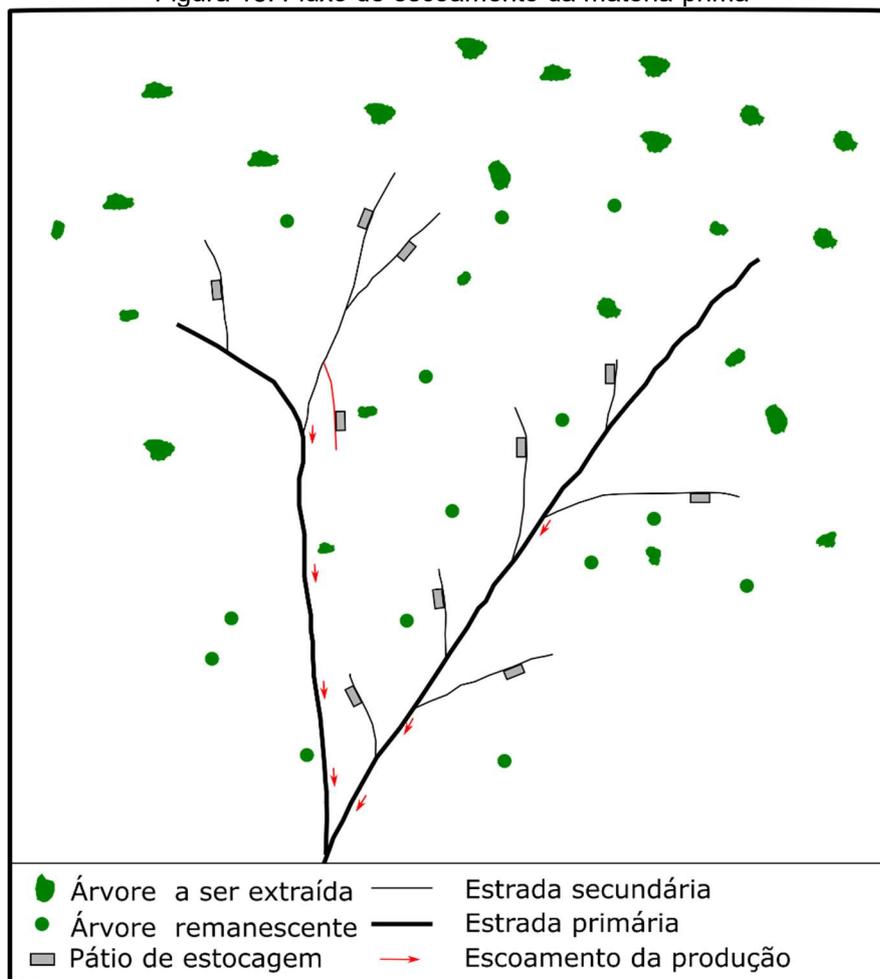
Fonte: Adaptado de Amaral et al. (1998, p. 53).

Seguindo os princípios do perfil vertical do terreno, é recomendável que em terreno ondulado, as estradas secundárias sejam construídas considerando os seguintes critérios: inclinação máxima de 2% em trechos curvos e 8-10% em retas. Ou seja, em uma reta com inclinação superior a 8-10%, deverá ser previsto um desvio buscando diminuir o comprimento da via para o trecho mais próximo que atenda aos pré-requisitos de inclinação máxima (AMARAL et al., 1998; BOWMAN; HESSLER, 1983; SESSIONS et al., 2007). Além disso, para melhorar o escoamento da água, elas devem ser construídas em formato abaulado com cerca de 2% inclinação.

Uma das medidas, especificamente no traçado de estradas secundárias, estabelece que elas tenham largura entre 4 e 6 metros e suas laterais não devem ser desmatadas (BRASIL, 2002). Tal medida dificulta o tráfego de veículos longos e pesados em período chuvoso, então o tráfego de tais veículos deve ser planejado para a execução durante a estiagem. Outra limitação proveniente dessa largura é a impossibilidade de tráfego em duas vias. Então o tráfego em dois sentidos deverá ser controlado. Por fim, dificulta a penetração dos raios solares e com isso, a secagem das estradas (AMARAL et al., 1998; DYKSTRA; HEINRICH, 1996; FFT, 2002).

Devido à esta limitação, ao projetar o traçado, deve-se considerar o fluxo de escoamento da matéria-prima, pois neste caso, o acesso às estradas secundárias deve ser sempre no sentido oposto ao fluxo, para facilitar o trânsito dos veículos, evitando manobras que podem vir a prejudicar o tráfego e a produtividade do transporte (Figura 18).

Figura 18. Fluxo de escoamento da matéria-prima

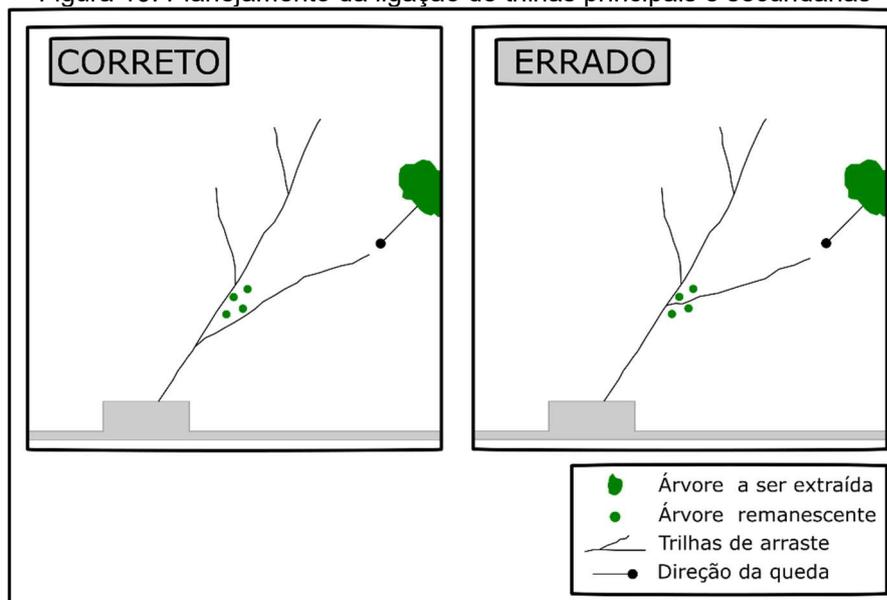


Fonte: O autor.

A trilha de arraste geralmente é aberta com a largura similar à da estrada secundária, em torno de 4 metros. Contudo, essa atividade só é realizada no momento em que o trator se dirige para a mata a fim de executar o arraste da tora, para isso, o tratorista segue a marcação feita previamente. A marcação deve ser realizada seguindo alguns critérios que viabilizem a trafegabilidade e a minimização dos danos à floresta remanescente (DYKSTRA; HEINRICH, 1996; FFT, 2002).

As trilhas principais devem ser retas, sempre que possível, ou com curvas abertas e a junção de uma trilha principal com uma secundária, não deve exceder 45° de ângulo na curva, pois isso forçaria o tratorista a fazer manobras na curva. Além disso, devem ser planejadas em locais livres de obstáculos (Figura 19), como árvores matrizes e de valor comercial futuro (AMARAL et al., 1998; DYKSTRA; HEINRICH, 1996; EPSTEIN et al., 2006; FFT, 2002; SILVA et al., 2018a).

Figura 19. Planejamento da ligação de trilhas principais e secundárias



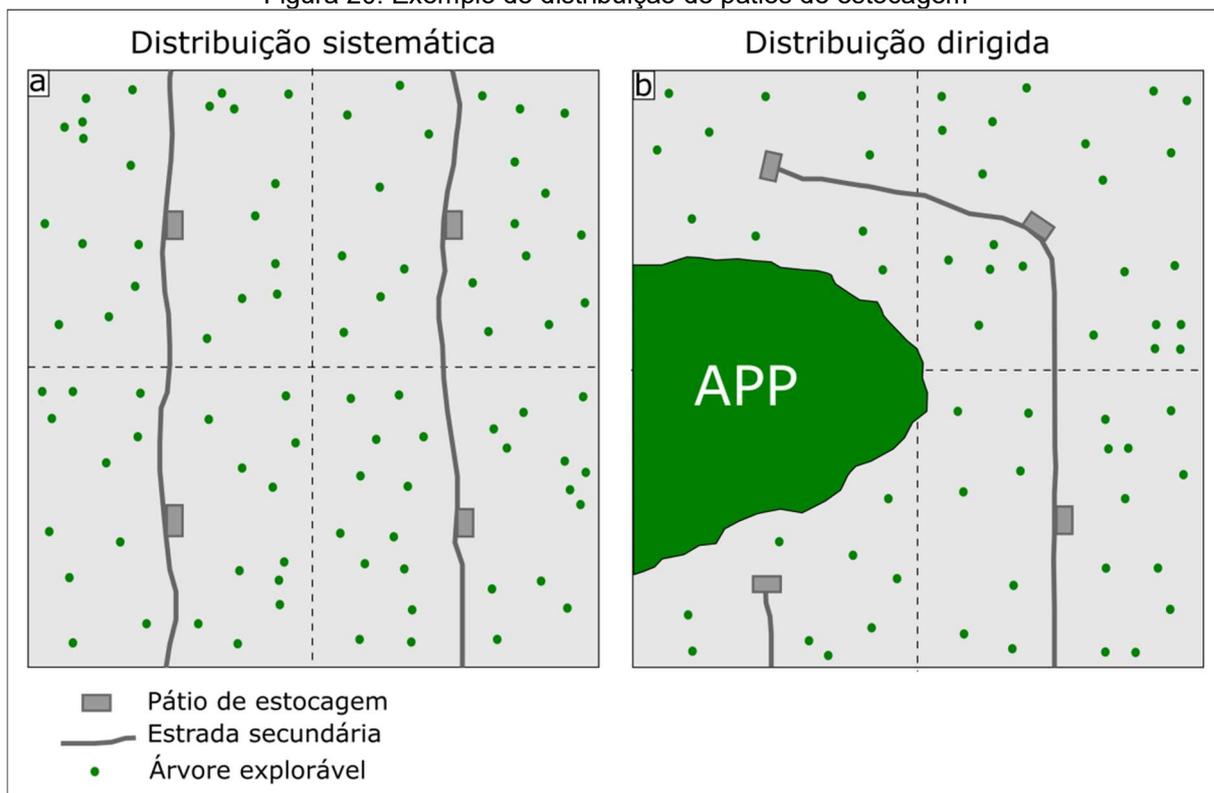
Fonte: Adaptado de Amaral et al. (1998, p. 49).

#### 2.4.7.2 Pátios de estocagem

Os pátios de estocagem são áreas abertas ao longo das estradas secundárias para que as toras extraídas da floresta possam ser arrastadas e empilhadas até essa área pelo trator florestal. Posteriormente, os caminhões são carregados na área do pátio e transportam a madeira para fora da floresta. Assim, os pátios devem ter tamanho suficiente para permitir a movimentação de trator florestal e caminhão. Podem-se alocar os pátios de forma sistemática ou dirigida.

Na forma sistemática, os pátios possuem tamanho igual e são distribuídos em intervalos regulares ao longo da estrada (Figura 20a). A alocação sistemática só é recomendada para áreas planas e com uniformidade no solo e no volume de madeira (AMARAL et al., 1998; FFT, 2002). Como essas características não são comuns em floresta nativa pode-se dizer que esse modelo não é apropriado, tendo em vista a diversidade de espécies e idades das árvores exploráveis.

Figura 20. Exemplo de distribuição de pátios de estocagem



Fonte: Adaptado de Amaral et al. (1998, p. 43).

Uma alternativa é o uso da distribuição dirigida (Figura 20b), que é aplicável em áreas irregulares em termos de solo, topografia, volume entre outros fatores. Caso haja irregularidade no terreno, é importante que, mesmo neste caso, os pátios sejam alocados em áreas planas e deve-se evitar a alocação nas proximidades das curvas da estrada secundária (AMARAL et al., 1998). Em áreas muito íngremes, é preferível que a localização dos pátios seja nas áreas mais altas, pois o arraste em subida é preferível ao em declive (DYKSTRA; HEINRICH, 1996; SIST, 2000).

Outros critérios que podem ser adotados para a escolha dos locais da alocação dos pátios, são: Áreas com alta concentração de cipós, áreas com baixa densidade de árvores de grande porte e áreas com clareira natural (AMARAL et al., 1998; FFT, 2002).

O tamanho do pátio também pode variar de acordo com o volume a ser explorado nas imediações do pátio. Contudo, deve-se garantir um tamanho mínimo que permita a movimentação para o empilhamento e transporte da madeira, logo, o tipo de veículo utilizado nas operações de arraste, empilhamento e transporte influem na determinação do tamanho mínimo. Outro fator que influi é o sistema de transporte, pois este determinará a quantidade necessária de espaço para

armazenar o volume de madeira (AMARAL et al., 1998; DYKSTRA; HEINRICH, 1996; FFT, 2002).

Há dois tipos de sistema de transporte, o paralelo, que exige menos espaço para armazenagem, pois o transporte ocorre em paralelo ao arraste. O segundo sistema é o posterior, em que, o transporte só ocorre depois que toda a madeira é arrastada para o pátio. Assim, a área aberta deve comportar todo o estoque (AMARAL et al., 1998). O Quadro 12 disponibiliza valores de referência para a definição do tamanho do pátio.

Quadro 12. Tamanho de pátios em função do modelo de transporte e tamanho do caminhão

Sistema de transporte	Tamanho do caminhão	
	Pequeno	Longo
Posterior ao arraste	20 m comp. x 25 m largura	25 m comp. x 25 m largura
Paralelo ao arraste	20 m comp. x 20 m largura	25 m comp. x 20 m largura

Fonte: Adaptado de Amaral et al. (1998, p. 44).

#### 2.4.7.3 Adoção das práticas de exploração de impacto reduzido

Em se tratando de florestas naturais, boa parte das técnicas indicadas para a redução no impacto ambiental, é proveniente do conjunto de práticas da exploração de impacto reduzido (EIR). Muitas delas foram incorporadas na legislação brasileira, conforme pode ser observado no Quadro 13 que apresenta um resumo das práticas relacionadas à construção de estradas, trilhas e pátios que devem ser observadas ao manejar florestas nativas. Assim, parte das práticas deve ser aplicada por força da lei, como é o caso do corte seletivo, outras dependerão do envolvimento do setor florestal na manutenção da floresta remanescente.

Quadro 13. Principais práticas indicadas para adoção no planejamento de infraestruturas: EIR ou lei? (Continua)

Técnica	Referência	
	Lei / IN	EIR
Sistema policíclico (corte seletivo; ciclo de corte; UPA).	Brasil (2002*, 2006c, 2012)	Braz et al. (1998); Reis et al. (2013)
Desvio de áreas impróprias e inaptas à exploração (rios; APPs; igarapés; faixa marginal; cumes; entre outras).	Brasil (2006c, 2012)	Akay (2006); Amaral et al. (1998); Burrough Junior e King (1989); Dykstra e Heinrich (1996); Espada et al. (2013); Sist (2000)
Desvio de obstáculos (árvores matrizes; nascentes; árvores remanescentes; árvores protegidas por lei, entre outros).	Brasil (2006c, 2012)	Dykstra e Heinrich (1996); Espada et al. (2013); Figueiredo, Braz e d'Oliveira (2007)
Minimizar corte e aterro (aproveitar o relevo natural na construção de infraestruturas).	-	Dykstra e Heinrich (1996); Sist (2000)
Aplicar o sistema de drenagem (sarjetas; drenos transversais; bueiros e saídas d'água).	Brasil (2002)*	Dykstra e Heinrich (1996); Pinard et al. (1995); Sist (2000)
Projeto geométrico (raio mínimo de curva, greide mínimo, greide máximo).	-	-

Quadro 13. Principais práticas indicadas para adoção no planejamento de infraestruturas: EIR ou lei? (Conclusão)

Densidade ótima de estradas e separação ótima de estradas.	-	Braz (1997); Duka et al. (2017); Dykstra e Heinrich (1996); Figueiredo, Braz e d'Oliveira (2007); Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 1974); Sessions et al. (2007)
Arraste mecanizado proibido em áreas com declividade superior a 17°.	-	Amaral et al. (1998); Ezzati et al. (2015); Sist (2000)**
Exploração proibida em áreas com declividade superior a 45°.	Brasil (2012)	Amaral et al. (1998); Pinard et al. (1995); Sist (2000)***
Largura máxima de estradas e trilhas.	Brasil (2002)*	Amaral et al. (1998); Bowman e Hessler (1983); Dykstra e Heinrich (1996); Sist (2000)
Velocidade diretriz.	-	-
Minimizar a distância de arraste.	Brasil (2002)*	Amaral et al. (1998); Braz (1997); Dykstra e Heinrich (1996); Pinard et al. (1995); Silva et al. (2018a); Sist (2000)
Limitação no número de árvores que podem ser arrastadas pela mesma trilha.	Brasil (2002)*	Amaral et al. (1998); Fundação Floresta Tropical (FFT, 2002)
Abertura de estradas no sentido Leste-Oeste.	Brasil (2002)*	Amaral et al. (1998); Reis et al. (2013)
Junção das trilhas não deve exceder 45°.	-	Amaral et al. (1998); Fundação Floresta Tropical (FFT, 2002); Silva et al. (2018a)
Tamanho dos pátios.	Brasil (2002)*	Amaral et al. (1998); Fundação Floresta Tropical (FFT, 2002); Sist (2000)
Privilegiar a alocação dos pátios em áreas planas (evitar curvas e áreas de alta densidade de árvores).	-	Amaral et al. (1998)

Notas: \* A Instrução Normativa 4 de 2002 menciona que em uma vistoria técnica, o item em questão será verificado e que a empresa responsável será orientada, caso seja encontrada irregularidade. \*\* Os autores apresentam valores de declividade variados em função da prática regional. Amaral et al. (1998) indica que o arraste pode ser efetuado em declividade igual ou inferior a 22° ( $\cong 40\%$ ). Ezzati et al. (2015) considera 20° ( $\cong 35\%$ ) e Sist (2000) descreve como sendo 17° ( $\cong 30\%$ ) o limite máximo de declividade. \*\*\* Sist (2000) indica que áreas com inclinação superior a 35° ( $\cong 70\%$ ) devem ser excluídas da exploração, mas a legislação Brasileira estabelece como sendo 45°.

Fonte: O autor.

Houve um considerável avanço com o manejo florestal sustentável, contudo, muitas destas medidas mencionadas não estão sendo observadas mesmo em empresas que declaram a adoção do PMFS, perdendo assim os benefícios que elas trazem. Por exemplo, o estudo de Sabogal et al. (2006) indicou que apenas as práticas que exigem a apresentação de relatórios à órgãos regulatórios tem taxas altas de adoção, o que não ocorre com práticas igualmente importantes, mas de difícil fiscalização, como por exemplo, o corte direcionado e o arraste controlado.

Além disso, observam-se também medidas que são adotadas, mas que não resultam na melhor relação de custo x benefício x impacto, como por exemplo, a distância entre estradas e a sistematização das mesmas (BRAZ, 1997; FAO, 1974; FIGUEIREDO, BRAZ E D'OLIVEIRA, 2007). Contudo, um bom planejamento deve

considerar, não só a viabilidade econômica do projeto, mas também a manutenção da floresta para uso futuro (HOLMES et al. 2002; SFB, 2011). Essa revisão permitiu realizar algumas considerações neste respeito.

## 2.5 Métodos de Otimização

A otimização, também conhecida como pesquisa operacional (PO), é o processo de obtenção do "melhor" resultado possível de um problema, conforme um determinado critério expresso pelo objetivo. Na prática, a palavra "otimizar" significa alcançar um ótimo, que pode ser o máximo ou o mínimo, por exemplo, máximo lucro ou mínimo custo. Assim, a definição da PO é o ramo da matemática que abrange o estudo quantitativo dos ótimos e os métodos para encontrá-los. A prática, por outro lado, é a coleção de técnicas, métodos, procedimentos e algoritmos que podem ser usados para encontrar os ótimos (ARORA, 2004; NIEUWENHUIS, 1989).

Os problemas de PO ocorrem na maioria das áreas de conhecimento, como: engenharia, física, matemática, economia, administração, comércio, ciências sociais e política. Áreas típicas de aplicação são: a modelagem, os circuitos e sistemas, em projeto de ferramentas, instrumentos e equipamentos, na concepção de estruturas e edifícios, no controle de processo, no ajuste de curvas, na solução de sistemas de equações, na programação de produção, no controle de qualidade, na manutenção e reparo, no controle de estoques, na contabilidade, no orçamento, dentre outras (ANTONIOU; LU, 2007; MCCORMACK, 1982).

A maioria dos problemas da vida real tem várias soluções e, assumindo que o problema em questão admite mais de uma solução, a otimização pode ser obtida encontrando a melhor solução do problema, dado algum critério de desempenho (GONZALEZ, 2007).

### 2.5.1 Abordagens para a otimização

Há várias abordagens para a otimização, como: métodos analíticos, gráficos, experimentais, numéricos e aproximativos (ANTONIOU; LU, 2007). Os métodos analíticos baseiam-se nas técnicas clássicas do cálculo diferencial. Um método gráfico pode ser usado para traçar a função e suas restrições, a ser maximizada ou minimizada se o problema tem apenas duas variáveis. Nos métodos experimentais, o sistema é configurado e as variáveis do processo são ajustadas uma a uma e o critério de desempenho é medido em cada caso. Este método pode levar a condições de operação ótimas ou quase ótimas, no entanto, não há resultados

confiáveis, pois em determinados sistemas, duas ou mais variáveis interagem entre si e devem ser ajustadas simultaneamente para obter o critério de desempenho ideal (ANTONIOU; LU, 2007; ARORA, 2004; LACHTERMACHER, 2018).

Na abordagem de métodos numéricos são utilizados procedimentos iterativos para gerar uma série de soluções, progressivamente aprimoradas para o problema de PO, começando com uma estimativa inicial para a solução. O processo é finalizado quando algum critério de convergência é satisfeito. Por exemplo, quando alterações nas variáveis independentes ou no critério de desempenho de iteração para iteração se tornam insignificantes. Os métodos numéricos podem ser usados para resolver problemas de otimização altamente complexos e podem ser programados no computador. A área de conhecimento que abrange a teoria e prática dos métodos de otimização numérica é conhecida como programação matemática (ARORA, 2004) e abrange técnicas, como: programação linear, linear inteira, quadrática, não-linear, dinâmica (ANTONIOU; LU, 2007).

Por fim, os métodos aproximativos foram formalmente introduzidos na década de 1960, com o objetivo de gerar soluções quase ótimas para os problemas de otimização do tipo NP-difícil, ou seja, problemas que não podem ser resolvidos eficientemente pela programação matemática. Para lidar, em um sentido prático, com os problemas NP-difícil, algumas técnicas foram introduzidas nas décadas de 1980 e 1990. Essas foram denominadas como meta-heurísticas e incluem o *Simulated Annealing* (SA), a Colônia de Formigas, a busca tabu, o algoritmo genético e outros. Outras metodologias previamente estabelecidas, como a busca local, e o *branch-and-bound* também foram exploradas na época (GONZALEZ, 2007).

Nos últimos 15 anos, os algoritmos de aproximação atraíram consideravelmente mais atenção. Atualmente, a área de meta-heurísticas se estabeleceu como uma importante área de pesquisa. O objetivo dos algoritmos de aproximação é fornecer as melhores soluções possíveis e garantir que tais soluções satisfaçam certas propriedades importantes, geralmente definidas por restrições. Além disso, esses algoritmos foram desenvolvidos para resolver uma grande variedade de problemas (GONZALEZ, 2007).

Na área florestal os estudos em otimização iniciam na década de 1970 (MCCORMACK, 1982; NIEUWENHUIS, 1989), contudo, muitos avanços tem ocorrido em estudos mais recentes, como em Acuna e Murphy (2005), Akay (2006),

Augustynczyk, Arce e Silva (2015), Boukherroub, Lebel e Ruiz (2015), Braz, Carnieri e Arce (2004), Campos et al. (2013), Dems, Rousseau e Frayret (2015), Ferreira et al. (2016), Jin e Pukkala (2016), Silva et al. (2006), Silva et al. (2018a) e Silva et al. (2018b).

### 2.5.2 O problema do caminho mais curto (PCMC)

A escolha do local de construção da estrada é complexa, pois envolve muitas restrições e objetivos. Assim, tal problema tem sido objeto de estudo na área de otimização. Kang et al. (2012), em uma revisão da literatura, apresentam vários estudos que abordam diferentes estratégias para a otimização. Dentre estas, a consideração do traçado de menor caminho com restrições que envolvem apenas o plano horizontal. Relataram também estudos que consideraram apenas o plano vertical e que envolviam tanto o plano horizontal, quanto vertical, mas algo comum em todas as abordagens é que o principal objetivo é obter o caminho mais curto.

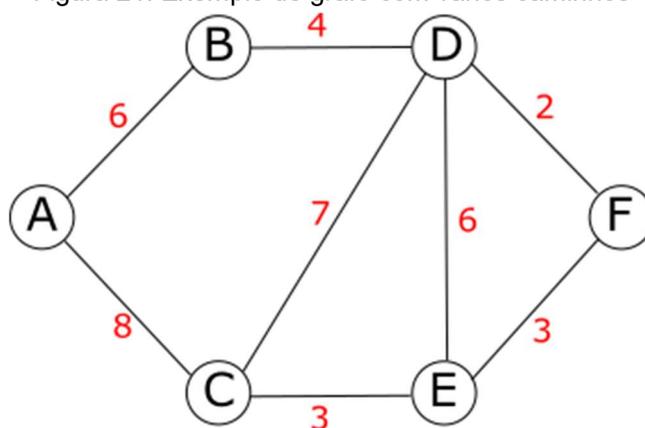
Assim, como no caso do problema de localização no plano euclidiano, o problema do caminho mais curto (PCMC), também denominado como problema do caminho mínimo, é um clássico da literatura de otimização. O problema florestal de definir o traçado de estradas, seja para reduzir a distância ou o custo, pode ser tratado como um problema de caminho mais curto.

O problema do caminho mínimo pode ser descrito da seguinte forma: sendo  $i$  e  $d$  dois vértices do grafo  $G = \{N, M\}$ , em que  $N = \{1, \dots, n\}$  representa o conjunto de vértices do grafo e  $M = \{1, \dots, m\}$  representa o conjunto de arestas, o caminho mínimo entre  $i$  e  $d$  é uma sequência de arestas, que liga  $i$  a  $d$ , passando por vértices distintos, acumulando a menor distância (GOLDBARG; GOLDBARG; LOUREIRO, 2016; GOLDBARG; LOUREIRO, 2005).

Uma premissa deste problema é que  $d$  seja um sucessor de  $i$  e que exista um caminho válido entre  $i$  e  $d$  em um conjunto  $N$ . Este problema está contextualizado dentro do problema de grafos e está associado a vários problemas combinatórios como: roteamento, programação e sequenciamento de tarefas, entre outros (GOLDBARG; LOUREIRO, 2005). Dentre os vários algoritmos eficientes disponíveis para resolver este problema, um dos mais conhecidos é o algoritmo de Dijkstra (1959). Uma alternativa para a resolução do problema é a programação dinâmica (GOLDBARG; GOLDBARG; LOUREIRO, 2016).

A Figura 21 exemplifica um grafo com vários vértices (nós): A, B, C, D, E e F e as arestas que ligam os referidos vértices. Cada aresta possui um peso entre o vértice de origem e o de destino. Este peso é o que determina o custo para percorrer o caminho entre um nó e outro por meio daquela aresta. Além disso, o peso pode ser uma informação de distância, ou custo, ou ainda capacidade, entre outras questões, que serão determinadas conforme o problema que se pretende resolver. Neste grafo não há uma seta indicando a direção na aresta. Neste caso, conclui-se que o caminho pode ser percorrido nas duas direções.

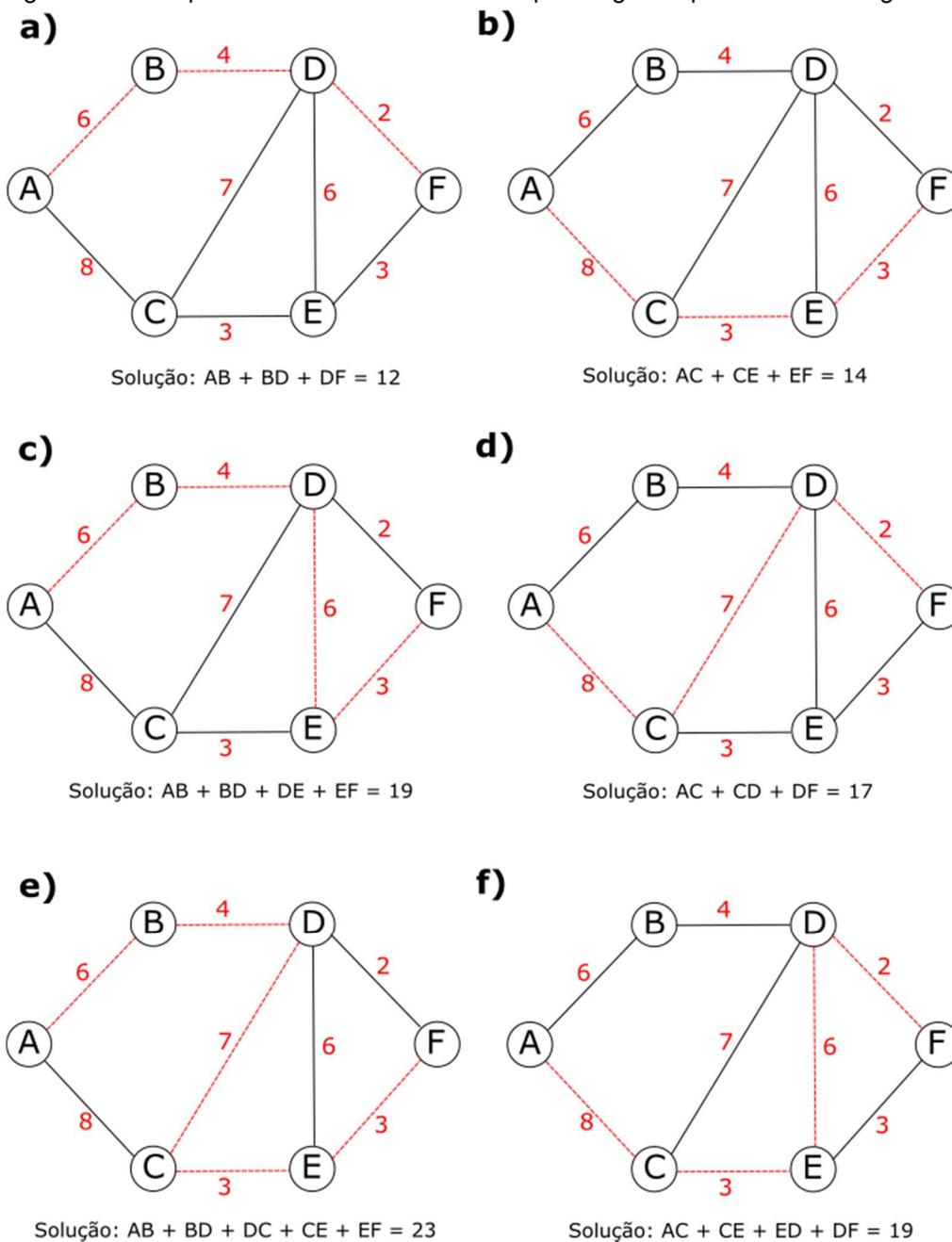
Figura 21. Exemplo de grafo com vários caminhos



Fonte: O autor.

A Figura 22 ilustra várias soluções de caminho para percorrer o grafo do ponto A até o ponto F. Observe que, com as seis possíveis soluções, há vários resultados obtidos, conforme o caminho que foi selecionado, e naturalmente, um dentre os caminhos apresenta o menor peso total (Figura 22a). Conforme já mencionado o peso pode referir-se à distância, ou custo, entre outros. É importante salientar que, há outras possíveis combinações, que levam do ponto A ao F. Para o grafo apresentado no exemplo, não se limitando às seis possíveis soluções apresentadas no exemplo.

Figura 22. Exemplo de caminhos selecionados para o grafo apresentado na Figura 21



Fonte: O autor.

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **A policy on geometric design of highways and streets**. 4. Ed. Washington, DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001. 905 p. ISBN 1-56051-156-7.

ACUNA, M. A.; MURPHY, G. E. Optimal bucking of douglas fir taking into consideration external properties and wood density. **New Zeland Journal of Forestry Science**, New York, NY, USA, v. 35, n. 2, p. 139–152, ago. 2005. ISSN 0048-0134.

AKAY, A. E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. **Sadhana**, Bangalore, Karnataka, India, v. 31, n. 5, p. 621–633, out. 2006. ISSN 0973-7677. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02715918>>.

AMARAL, P.; VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; VIDAL, E. **Floresta para sempre: um manual para a produção de madeira na amazônia**. Belém, PA: Imazon, 1998. 130 p.

ANTONIOU, A.; LU, W. **Practical Optimization: Algorithms and engineering applications**. Victoria, British Columbia, CA: Springer International Publishing, 2007. 670 p. ISBN 978-0-387-71106-5.

ARIMA, E. Y.; WALKER, R. T.; SALES, M.; JR., C. S.; PERZ, S. G. The fragmentation of space in the amazon basin: Emergent road networks. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 6, p. 699–709, 2008. ISSN 0099-1112. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14358/PERS.74.6.699>>.

ARORA, J. S. **Introduction to optimum design**. 2. Ed. San Diego, California, USA: Elsevier Academic Press, 2004. 728 p. ISBN 0-12-064155-0.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. da. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, Lavras, MG, v. 21, n. 4, p. 649–656, nov. 2015. ISSN 0104-7760. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/01047760201521042006>>.

BAEK, J.; CHOI, Y. A new method for haul road design in open-pit mines to support efficient truck haulage operations. **Applied Sciences**, v. 7, n. 7, 2017. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/7/7/747>>.

BALIEIRO, M. R.; ESPADA, A. L. V.; NOGUEIRA, O.; PALMIERI, R.; LENTINI, M. **As concessões de florestas públicas na Amazônia Brasileira: um manual para pequenos e médios produtores florestais**. 2. ed. Piracicaba, SP: Imaflora, 2010. 204 p. ISBN 978-85-98081-36-6.

BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2, p. 145–173, 2005. ISSN 0304-3800. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.059>>.

BOUKHERROUB, T.; LEBEL, L.; RUIZ, A. A methodology for sustainable forest resource allocation: a Canadian case study. **Interuniversity Research Centre on Enterprise Network**, Montréal, Québec, CA, p. 2–27, jan. 2015.

BOWMAN, J. K.; HESSLER, R. A. New look at optimum road density for gentle topography. In: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 898. PROC. THIRD INTERNATIONAL LOW-VOLUME ROADS CONFERENCE, 3., 1983, Washington, D.C. **Anais...** Washington, D.C., 1983. P. 30–36. ISSN 0361-1981.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Resolução nº 406, de 2 de fev. de 2009. **Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável-PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia**, Brasília, DF, fev. 2009.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários**, Rio de Janeiro, RJ: DNER, 1999. 375p.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro, RJ: DNER, 1999. 195 p.

BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de set. de 1965. **Institui o novo Código Florestal**, Brasília, DF, set 1965.

BRASIL. Lei nº 11.284, de 2 de mar. de 2006. **Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável**, Brasília, DF, mar 2006.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**, Brasília, DF, maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa nº 4, de 4 de mar. de 2002. **Dispõe sobre os procedimentos relativos às atividades de Manejo Florestal Sustentável de Uso Múltiplo na Amazônia Legal**, Brasília, DF, mar. 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa nº 4, de 11 de dez. de 2006. **Dispõe sobre a Autorização Prévia à Análise Técnica de Plano de Manejo Florestal Sustentável-APAT**, Brasília, DF, dez. 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa nº 5, de 11 de dez. de 2006. **Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFSs nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências**, Brasília, DF, dez. 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Serviço Florestal Brasileiro. **Plano Anual de Outorga Florestal: 2018**. Brasília: MMA, 2007, v. 12, n. 1, out. 2017. ISSN 2176-6797.

BRAZ, E. M. **Otimização da rede de estradas secundárias em projetos de manejo sustentável de floresta tropical**. Rio Branco, AC: Embrapa-CPAF/AC, 1997. 36 p. Circular Técnica, 15.

\_\_\_\_\_. Manejo da floresta nativa e sua viabilidade. In: SEMINÁRIO EM TECNOLOGIA DA MADEIRA E PRODUTOS FLORESTAIS NÃO-MADEIRÁVEIS, 2., 2002, Curitiba, Paraná. **Congresso Ibero-Americano de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Florestais**. Curitiba, Paraná, 2002. P. 1–11.

\_\_\_\_\_. **Planejamento da Exploração em Florestas Naturais**. 1. ed. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2005. 32 p. ISBN 1517-526X.

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, fev. 2004. ISSN 0100-6762. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622004000100010>>.

BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; ARAÚJO, H. J. B. de; MIRANDA, E. M. de. **Plano de exploração sob critérios de manejo florestal de baixo impacto**. Rio Branco, AC: Embrapa-CPAF/AC, 1998. 20 p. Circular Técnica, 27.

BURROUGH JUNIOR, E. R.; KING, J. G. **Reduction of soil erosion on forest road**. 1. Ed. Utah: Intermountain Research Station, 1989. 21 p.

CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L. da; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. da S. Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando programação inteira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 5, p. 881–887, ago. 2013. ISSN 0100-6762. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622013000500010>>.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. Ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 605 p. ISBN 978-85-7269-465-0.

DELLEUR, J. W. Hydraulic structures. In: CHEN, W. F.; LIEW, J. Y. R. (Ed.). **The civil engineering handbook**. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2002. P. 1222–1265. ISBN 0-8493-0958-1.

DEMS, A.; ROUSSEAU, L.-M.; FRAYRET, J.-M. Effects of different cut-to-length harvesting structures on the economic value of a wood procurement planning problem. **Annals of Operations Research**, Dordrecht, Netherlands, v. 232, n. 1, p. 65–86, set. 2015. ISSN 0254-5330. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10479-013-1336-1>>.

DUKA, A.; GRIGOLATO, S.; PAPA, I.; PENTEK, T.; PORŠINSKY, T. Assessment of timber extraction distance and skid road network in steep karst terrain. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 10, n. 6, p. 886–894, 2017. ISSN 1971-7458. Disponível em: <<https://doi.org/10.3832/ifor2471-010>>.

DYKSTRA, D. P.; HEINRICH, R. **FAO model code of forest harvesting practice**. 1. ed. Rome: FAO, 1996. ISBN 92-5-103690-X.

EASA, S. M. Geometric design. In: CHEN, W. F.; LIEW, J. Y. R. (Ed.). **The civil engineering handbook**. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2002. P. 2487–2525. ISBN 0-8493-0958-1.

EMBRAPA (Acre). **Avaliação dos impactos da tecnologia**: Recomendação modelo digital de exploração florestal (modeflora) no Acre. Rio Branco, Acre: EMBRAPA, 2015. 14 p.

EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A.; SAPUNAR, P.; NIETO, E.; SESSIONS, J. B.; SESSIONS, J.; BUSTAMANTE, F.; MUSANTE, H. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. **Operations Research**, v. 54, n. 6, p. 1017–1027, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/opre.1060.0331>>.

ESPADA, A. L. V.; PIRES, I. P.; LENTINI, M. A. W.; BITTENCOURT, P. R. G. **Manejo Florestal e Exploração de Impacto Reduzido em Florestas Naturais de Produção da Amazônia**: Informativo técnico 1. Altamira, PA: Instituto Florestal Tropical, 2013. 31 p.

\_\_\_\_\_. **As Concessões de Florestas Públicas na Amazônia Brasileira**: Informativo técnico 2. Altamira, PA: Instituto Florestal Tropical, 2016. 31 p.

EWEL, J.; CONDE, L. F. **Potential ecological impact of increased intensity of tropical forest utilization**: Final report to usda forest service. Florida, EUA: Botany Department of University of Florida, 1976. 115 p. ISSN 0125-975X.

EZZATI, S.; NAJAFI, A.; YAGHINI, M.; HASHEMI, A. A.; BETTINGER, P. An optimization model to solve skidding problem in steep slope terrain. **Journal of Forest Economics**, v. 21, n. 4, p. 250–268, 2015. ISSN 1104-6899. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfe.2015.10.001>>.

FALCK-JENSEN, K. Geometric alignment design. In: ROBINSON, R.; THAGESEN, B. (Ed.). **Road engineering for development**. 2. Ed. Rome: Spon Press, 2004. P. 224–243. ISBN 0-203-30198-6.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Logging and log transport in tropical high forest**: a manual on production and costs. Rome: FAO, 1974. 90 p.

\_\_\_\_\_. **The Global Forest Resources Assessment**: desk reference. Rome: FAO, 2015. 248 p.

FATEHI, P.; DAMM, A.; LEITERER, R.; BAVAGHAR, M. P.; SCHAEPMAN, M. E.; KNEUBÜHLER, M. Tree density and forest productivity in a heterogeneous alpine environment: Insights from airborne laser scanning and imaging spectroscopy. **Forests**, v. 8, n. 6, 2017. ISSN 1999-4907. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1999-4907/8/6/212>>.

FERREIRA, L.; CONSTANTINO, M.; BORGES, J.; GARCIA-GONZALO, J.; BARREIRO, S. A climate change adaptive dynamic programming approach to optimize eucalypt stand management scheduling: a portuguese application. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, CA, v. 46, n. 8, p. 1000–1008, mai. 2016. ISSN 0045-5067. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0329>>.

FFT – FUNDAÇÃO FLORESTA TROPICAL. **Manual de procedimentos técnicos para condução de manejo florestal e exploração de impacto reduzido**. Belém, PA: Fundação Florestal Tropical, 2002. 89 p.

FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. 1. Ed. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007. 183 p. ISBN 978-85-99190-04-3.

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e meta-heurísticas**: algoritmos e aplicações. 1. Ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2016. 416 p. ISBN 978-85-352-7812-5.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. 2. Ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2005. 518 p. ISBN 978-85-352-1520-5.

GONZALEZ, T. F. **Handbook of approximation algorithms and metaheuristics**. 1. Ed. Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall, 2007. 1427 p. ISBN 978-1-58488-550-4.

HALD, T.; HASSING, J.; HØGEDAL, M.; JACOBSEN, A. Hydrology and drainage. In: ROBINSON, R.; THAGESEN, B. (Ed.). **Road engineering for development**. 2. Ed. Rome: Spon Press, 2004. P. 178–204. ISBN 0-203-30198-6.

HEINRICH, R. Road embankment stabilization with biological and engineering works for forest roads. In: FAO (Ed.). **Logging and transport in steep terrain**. Rome: FAO, 1985. P. 77–88. ISBN 92-5-102218-6.

HOLMES, T. P.; BLATE, G. M.; ZWEEDE, J. C.; PEREIRA, R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F.; BAUCH, R. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, n. 1, p. 93–110, mar. 2002. ISSN 0378-1127. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00530-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00530-8)>.

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B. de; CUNHA, U. S. da. **Introdução ao Manejo e Economia de Florestas**. 1. Ed. Curitiba, PR: UFPR, 1998. 163 p. ISBN 978-8573350197.

JIN, X.; PUKKALA, T.; LI, F. Fine-tuning heuristic methods for combinatorial optimization in forest planning. **European Journal of Forest Research**, New York, NY, USA, v. 135, n. 4, p. 765–779, ago. 2016. ISSN 1612-4677. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10342-016-0971-x>>.

KANG, M.-W.; JHA, M. K.; SCHONFELD, P. Applicability of highway alignment optimization models. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Oxford, v. 21, n. 1, p. 257–286, set. 2012. ISSN 0968-090X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.09.006>>.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 5. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2018. 185 p. ISBN 978-85-216-3048-7.

LEE, S. H. **Introdução ao projeto geométrico de rodovias**. 2. Ed. Florianópolis, SC: UFSC, 2005. 430 p. ISBN 853-2802-33-8.

LIU, K.; SESSIONS, J. Preliminary planning of road systems using digital terrain models. **International Journal of Forest Engineering**, v. 4, n. 2, 1993. ISSN 1913-2220. Disponível em: <<https://journals.lib.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/10052>>.

LSELEY, T.; GOKHALE, S. Equipment productivity. In: CHEN, W. F.; LIEW, J. Y. R. (Ed.). **The civil engineering handbook**. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2002. P. 82–105. ISBN 0-8493-0958-1.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. 3. Ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2014. 543 p. ISBN 978-85-726-9491-9.

\_\_\_\_\_. **Estradas rurais e florestais**. 1. Ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 441 p. ISBN 978-85-8179-037-4.

\_\_\_\_\_. **Sistema brasileiro de classificação de estradas florestais (SIBRACEF): Desenvolvimento e relação com o meio de transporte florestal rodoviário**. 188 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1989.

MCCORMACK, R. J. Operations research in forest harvesting. **New Zealand Journal of Forestry Science**, New York, NY, USA, v. 12, n. 2, p. 332–343, jul. 1982. ISSN 0048-0134.

NEWNHAM, R. M. ROADPLAN: A Tool for Designing Forest Road Networks. **International Journal of Forest Engineering**, v. 6, n. 2, jan. 1995.

NIEUWENHUIS, M. Operations research in forestry. **Irish Forestry**, Dublin, v. 46, n. 1, p. 51–58, 1989. Disponível em: <<https://journal.societyofirishforesters.ie/index.php/forestry/article/viewFile/9654/8776>>.

NOGUEIRA, M. M.; LENTINI, M. W.; PIRES, I. P.; BITTENCOURT, P. G.; ZWEEDE, J. C. **Procedimentos simplificados em segurança e saúde do trabalho no manejo florestal**. Belém, PA: Instituto Florestal Tropical, 2010. 80 p. ISBN 978-85-63521-00-2.

OVERGAARD, K. R. Planning methods. In: ROBINSON, R.; THAGESEN, B. (Ed.). **Road engineering for development**. 2. Ed. Rome: Spon Press, 2004. P. 92–113. ISBN 0-203-30198-6.

PHILIPPART, J.; SUN, M.; DOUCET, J.-L.; LEJEUNE, P. Mathematical formulation and exact solution for landing location problem in tropical forest selective logging, a case study in southeast Cameroon. **Journal of Forest Economics**, v. 18, n. 2, p. 113–122, 2012. ISSN 1104-6899. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfe.2011.11.002>>.

PICCHIO, R.; PIGNATTI, G.; MARCHI, E.; LATTERINI, F.; BENANCHI, M.; FODERI, C.; VENANZI, R.; VERANI, S. The application of two approaches using gis technology implementation in forest road network planning in an Italian mountain

setting. **Forests**, v. 9, n. 5, 2018. ISSN 1999-4907. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1999-4907/9/5/277>>.

PINARD, M. A.; PUTZ, F. E.; TAY, J.; SULLIVAN, T. E. Creating timber harvest guidelines for a reduced-impact logging project in Malaysia. **Journal of Forestry**, v. 93, n. 10, p. 41–45, 1995.

PONTES FILHO, G. **Estradas de rodagem**: projeto geométrico. São Carlos, SP: G. Pontes Filho, 1998. 432 p.

PORTUGAL, C. R. M.; MACHADO, C. C.; SILVA, E. Construção e conservação de estradas rurais e florestais. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Gestão ambiental e impactos em estradas rurais e florestais**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2013.

REIS, S. L.; COUTO, C. S.; PINHEIRO, C. S.; ESPADA, A. L. V.; LIMA, J. A.; LENTINI, M. W. **Técnicas pré-exploratórias para o planejamento da exploração de impacto reduzido no manejo florestal comunitário e familiar**. Belém, PA: Instituto Floresta Tropical – IFT, 2013. 148 p. ISBN 978-85-63521-04-0.

RIBEIRO, C. A. A. S.; MARCATTI, G. E.; MUNARETTI, A. M.; SILVA, K. E. da; ALMEIDA, D. R. A. de; VASCONCELOS, R. dos S.; NETO, E. L. V. **Otimização do traçado de trilhas para acesso a recursos florestais naturais**. Manaus, AM: Embrapa Amazônia Ocidental, 2017. 99 p. ISSN 1517-3135.

ROTTA, W. G.; MICOL, L.; SANTOS, N. B. dos. **Manejo sustentável no portal da Amazônia**: um benefício econômico, social e ambiental. 1. Ed. Alta Floresta, MT: ICV, 2006. 24 p.

SABOGAL, C.; LENTINI, M.; POKORNY, B.; SILVA, J. N. M.; ZWEEDE, J.; VERÍSSIMO, A.; BOSCOLO, M. **Manejo florestal empresarial na Amazônia Brasileira**: Restrições e oportunidades. Belém, PA: Center for International Forestry Research – Cifor, 2006. 72 p. ISBN 979-24-4635-4.

SANTA CATARINA (Estado). Departamento de estradas de rodagem. Diretoria de estudos e projetos. **Diretrizes para a concepção de estradas (DCE)**: Condução do traçado. Florianópolis, SC: DER, 2000. 70 p.

SEDLAK, O. General principles of planning forest road-nets. In: FAO (Ed.). **Logging and transport in steep terrain**. Rome: FAO, 1985. p. 17–36. ISBN 92-5-102218-6.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo, SP: Editora PINI, 2007. v. 1. 779 p. ISBN 978-85-7266-199-7.

\_\_\_\_\_. **Manual de técnicas de projetos rodoviários**. 1. ed. São Paulo, SP: Editora PINI, 2008. 764 p. ISBN 978-85-7266-197-3.

SESSIONS, J.; BOSTON, K.; WING, M. G.; AKAY, A. E.; THEISEN, P.; HEINRICH, R. **Forest road operations in the tropics**. New York, NY, USA: Springer International Publishing, 2007. 170 p. ISBN 978-3-540-46392-4.

SFB – SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO E INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA. **Florestas nativas de produção brasileiras**. Brasília, DF: Serviço Florestal Brasileiro e IPAM, 2011. 28 p.

SILVA, E. F. da; SILVA, G. F. da; FIGUEIREDO, E. O.; BINOTI, D. H. B.; MENDONÇA, A. R. de; TORRES, C. M. M. E.; PEZZOPANE, J. E. M. Allocation of storage yards in management plans in the Amazon by means of mathematical programming. **Forests**, Basel, Switzerland, v. 9, n. 3, p. 1–20, mar. 2018. ISSN 1999-4907. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f9030127>>.

SILVA, G. F. da; GHISOLFI, E. M.; TEIXEIRA, A. F.; CABRINI, A. M.; JR., A. A. de B. O método das restrições na solução de um problema de planejamento florestal multiobjetivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE, v. 1, n. n. único, p. 41–48, dez. 2006. ISSN 1981-0997. Disponível em: <<http://agraria.pro.br/ojs-2.4.6/index.php?journal=agraria&page=article&op=view&path%5B%5D=807>>.

SILVA, P. H. da; GOMIDE, L. R.; FIGUEIREDO, E. O.; CARVALHO, L. M. T. de; FERRAZ-FILHO, A. C. Optimal selective logging regime and log landing location models: a case study in the Amazon forest. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 48, n. 1, p. 18–27, mar. 2018. ISSN 0044-5967. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201603113>>.

SIST, P. Reduced-impact logging in the tropics: objectives, principles and impacts. **The International Forestry Review**, Commonwealth Forestry Association, v. 2, n. 1, p. 3–10, 2000. ISSN 14655489, 20537778. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/42609931>>.

SOUZA, A. L. de; SOARES, C. P. B. **Florestas nativas: estrutura, dinâmica e manejo**. 1. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 322 p. ISBN 978-85-7269-463-6.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; JÚNIOR, F. I. K. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2013. 240 p. ISBN 978-85-7975-075-5.

THAGESEN, B. Soil investigation. In: ROBINSON, R.; THAGESEN, B. (Ed.). **Road engineering for development**. 2. ed. Rome: Spon Press, 2004. p. 137–161. ISBN 0-203-30198-6.

TIMOFEICZYK JUNIOR, R.; GRAÇA, L. R.; BERGER, R.; SOUSA, R. A. T. de Melo e; HOSOKAWA, R. T. Estrutura de custos do manejo de baixo impacto em florestas tropicais: um estudo de caso. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 35, n. 1, p. 89–103, abr 2005. ISSN 1982-4688. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v35i1.2433>>.

WALKER, R.; ARIMA, E.; MESSINA, J.; SOARES-FILHO, B.; PERZ, S.; VERGARA, D.; SALES, M.; PEREIRA, R.; CASTRO, W. Modeling spatial decisions with graph theory: logging roads and forest fragmentation in the brazilian amazon. **Ecological Applications**, v. 23, n. 1, p. 239–254, 2013. ISSN 1051-0761. Disponível em: <<https://doi.org/10.1890/11-1800.1>>.

WEAVER, W. E.; HAGANS, D. K. **Handbook for forest and ranch roads: A guide for planning, designing, constructing, reconstructing, maintaining and closing wildland**

roads. California, EUA: The Mendocino County Resource Conservation District, 1994. 197 p.

ZERBINI, F. **Cenário da madeira FSC no Brasil 2012 – 2013**. 1. Ed. São Paulo, SP: FSC Brasil, 2014. 43 p. ISBN 978-85-66565-02-7.

#### 4 CAPÍTULO 1 – ALOCAÇÃO ÓTIMA DE PÁTIOS DE ESTOCAGEM EM ÁREA DE MFS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

##### RESUMO

No manejo florestal sustentável de florestas da Amazônia é crucial um planejamento otimizado das infraestruturas de exploração para reduzir custos e impactos ambientais. Porém, existe um alto grau de complexidade em função da quantidade de variáveis envolvidas. Dentre estas infraestruturas, os pátios de estocagem de madeira são de extrema importância, pois influenciam diretamente na abertura de estradas florestais e trilhas de arraste. O objetivo da pesquisa foi avaliar a alocação de pátios de estocagem de madeira por meio de solução exata e meta-heurísticas em uma área de manejo florestal. A área de estudo foi uma floresta nativa sob regime de manejo florestal sustentável localizada na Amazônia brasileira. Foram formuladas três instâncias para a solução, sendo envolvidas 5.947 árvores e 3.172 possíveis pátios de estocagem de madeira. Foi utilizado um modelo de programação linear inteira binária solucionado pelo *software* CPLEX e por método aproximativo com as meta-heurísticas *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), *Tabu Search* (TS), *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Simulated Annealing* (SA). Foi observado que os valores de GAP aumentaram em função das instâncias. Embora, todas as meta-heurísticas tenham obtido soluções significativas com menor tempo de processamento, somente a SA obteve soluções viáveis em todas execuções nas três instancias. Em geral, as meta-heurísticas foram eficientes em obter soluções viáveis em tempo inferior ao CPLEX, o que representa a viabilidade do planejamento de alocação de pátios de estocagem em áreas extensas, e sem perdas significativas de exatidão do valor ótimo da solução do problema. O SA apresentou o melhor desempenho nas três instâncias avaliadas.

**Palavras-chave:** Meta-heurísticas; Pátios de estocagem de madeira; Sistemas de informação geográfica; Floresta tropical; Otimização do planejamento.

## CHAPTER 1 – OPTIMAL ALLOCATION OF MFS STORAGE YARD IN BRAZILIAN AMAZON

### ABSTRACT

In the sustainable forest management of Amazonian forests, it is essential to carry out the optimal planning of logging infrastructures to reduce costs and environmental impacts. However, there is a high degree of complexity due to the amount of variables involved. Among these infrastructures, wood storage yards are of utmost importance as they directly influence the opening of forest roads and trail trails. The objective of this research was to evaluate the allocation of wood storage yards through exact solution and metaheuristics in a forest management area. The study area was a native forest under sustainable forest management regime located in the Brazilian Amazon. Three instances were formulated for the solution, involving 5,947 trees and 3,172 possible wood storage yards. We used a binary integer programming model solved by exact method and approximate method the Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (*GRASP*), Tabu Search (*TS*), Variable Neighborhood Search (*VNS*) and Simulated Annealing (*SA*) metaheuristics. *GAP* values increased as a function of instances. Although all metaheuristics obtained significant solutions with shorter processing times, only *SA* obtained viable solutions in all executions in all three instances. In general, the metaheuristics were efficient in obtaining viable solutions in less than the exact method (*BILP*), which represents the feasibility of the planning of allocation of storage areas in large areas, and without significant losses of the optimum value accuracy. solution of the problem. The *SA* presented the best performance in the three evaluated instances.

**Keywords:** Metaheuristics; Storage yard; Geographic information system; Tropical forest; optimized planning.

## 4.1 INTRODUÇÃO

O manejo florestal sustentável (MFS) é a principal técnica empregada em áreas da Amazônia brasileira para exploração de madeira tropical. O MFS prevê o corte seletivo de árvores comerciais acima de um diâmetro mínimo de corte (DMC), atendendo a legislação vigente. Para a execução das atividades de MFS é necessária à instalação das infraestruturas de exploração florestal (estradas florestais, pátios de estocagem de madeira e trilhas de arraste). As estradas florestais têm o objetivo de conectar todos os pátios de estocagem de madeira e proporcionar um transporte mais eficiente. Os pátios servem de depósito das toras das árvores, que são abatidas e, posteriormente, arrastadas. A trilha de arraste é o caminhamento realizado, geralmente, pelo trator florestal Skidder, durante a extração da madeira até o pátio de estocagem.

Dessa forma, é imprescindível um planejamento otimizado dessas infraestruturas por gerar impactos ambientais e custos, bem como pela complexidade de decisão em função das variáveis envolvidas (CONTRERAS; CHUNG, 2007; SØVDE; LØKKETANGEN; TALBOT, 2013; SILVA et al., 2018a). É comum que o planejamento dessas infraestruturas seja realizado de forma intuitiva (PHILIPPART et al., 2012; SILVA et al., 2018a) com o auxílio de informações de um sistema de informação geográfica (SIG) (BASKENT; KELES, 2005; LIU; SESSIONS, 1993; NEWNHAM, 1995). Esse processo intuitivo está ligado à experiência do tomador de decisão, que demanda mais tempo para alocar a infraestrutura do que analisar a viabilidade do planejamento (SILVA et al., 2018a).

Os pátios de estocagem têm uma importância fundamental no planejamento, pois a sua localização influencia a abertura de estradas florestais e trilhas de arraste (PHILIPPART et al., 2012). Por isso, seu planejamento otimizado pode reduzir a quantidade necessária de infraestrutura e, conseqüentemente, os custos e impactos ambientais.

A alocação de pátios de estocagem de madeira em áreas de manejo florestal pode ser realizada por meio de programação matemática (PHILIPPART et al., 2012; SILVA et al., 2018a; SILVA et al., 2018b). Nesse caso, pode ser adotado o modelo matemático associado ao problema de p-medianas, que é um problema de programação linear inteira binária (PLIB). Esse problema é classificado na categoria de problemas NP-hard e sua solução é amplamente estudada por meio de meta-heurísticas (FERNANDES et al., 2014; GUASTARROBA; SPERANZA, 2014; HO,

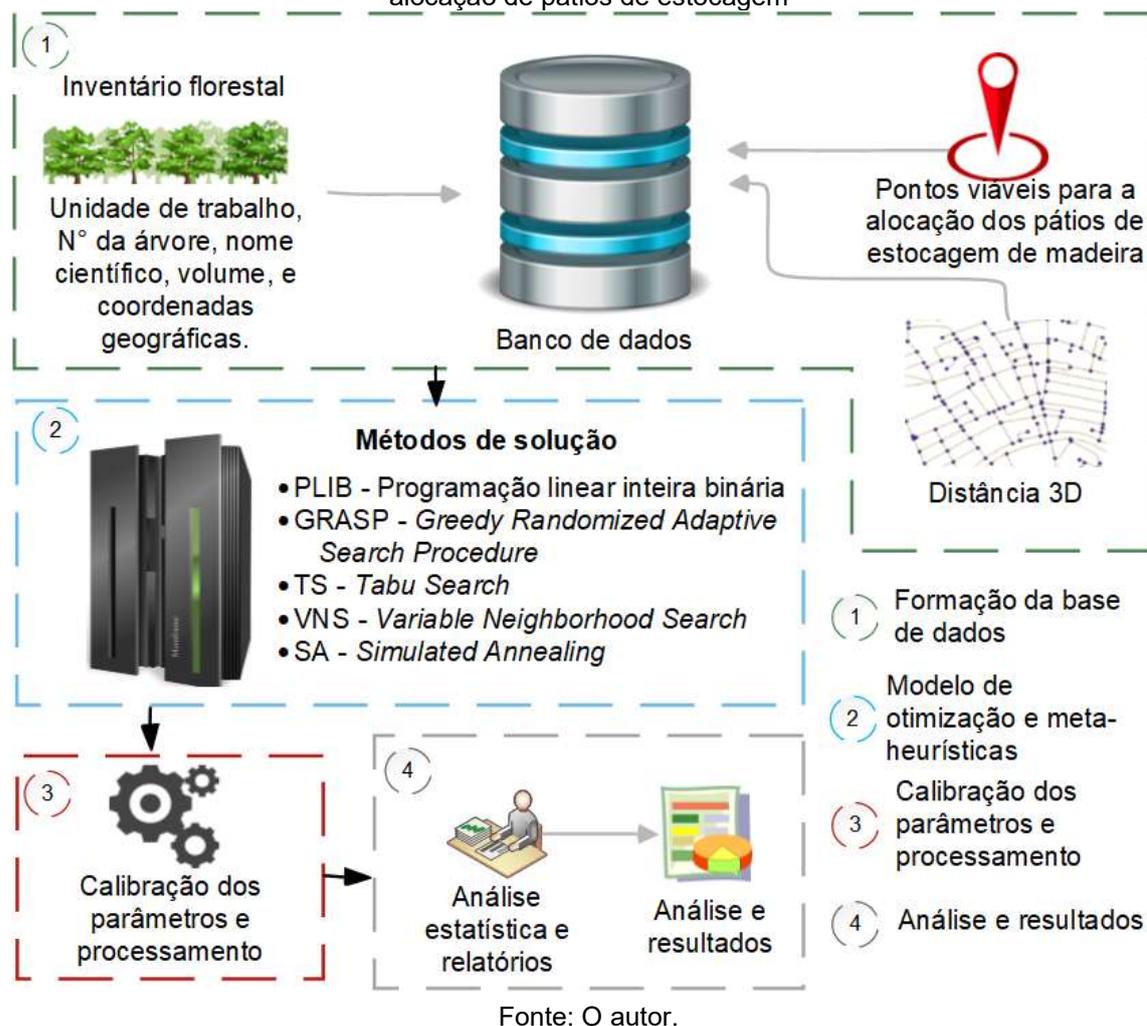
2015; MONTOYA et al., 2016; SANTOSA; KRESNA, 2015; YAGHINI; KARIMI; RAHBAR, 2013).

Ao definir a alocação de pátios de estocagem em grandes áreas de MFS ocorre o aumento exponencial de combinações possíveis. Esse fator inviabiliza o uso de métodos exatos para a obtenção de soluções em tempo computacional aceitável. Diante do exposto, o objetivo deste capítulo foi avaliar a alocação de pátios de estocagem de madeira por meio de solução exata e meta-heurísticas em uma área de manejo florestal na Amazônia brasileira. Isso possibilitará que a técnica mais adequada para o conjunto de dados seja adotada para a alocação de pátios e, como consequência, melhores resultados possam ser obtidos na alocação das estradas secundárias, que farão a ligação entre as estradas primárias e os pátios.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os seguintes passos metodológicos foram seguidos para a análise dos resultados propostos pela pesquisa: formação da base de dados; modelo de otimização e meta-heurísticas; calibração dos parâmetros e processamento; e, análise e resultados. O esquema metodológico (Figura 23) representa as etapas necessárias para o desenvolvimento da presente pesquisa.

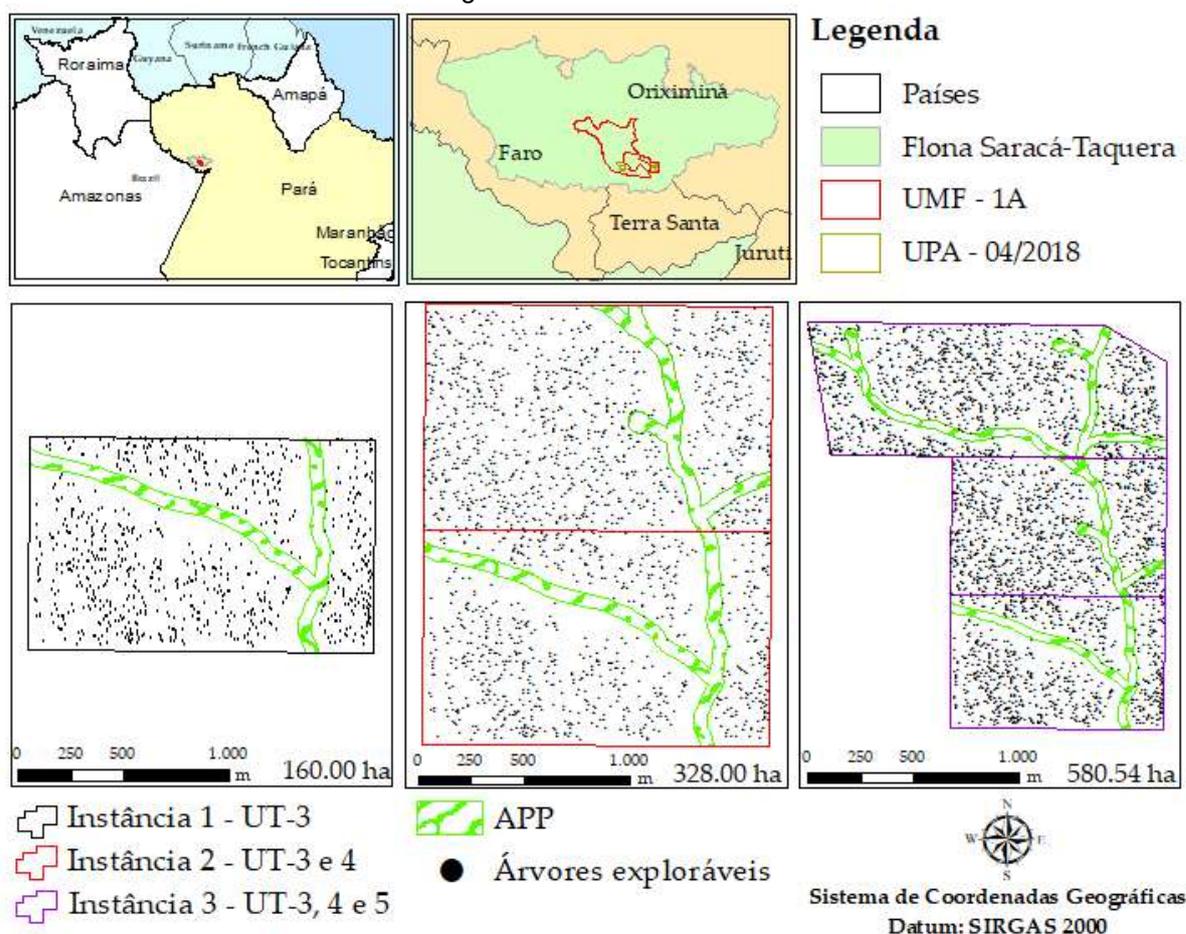
Figura 23. Fluxograma metodológico de processamento dos métodos de solução para o problema de alocação de pátios de estocagem



#### 4.2.1 Etapa 1 do fluxograma: Formação da base de dados

Para avaliar os métodos de solução, foi utilizada como área de estudo a Unidade de Manejo Florestal (UMF) 1A, que possui 26.897,96 hectares e está localizada na coordenada geográfica 1°45'23" S e 56°34'21" W, situada nos municípios de Terra Santa e Oriximiná, no estado do Pará. Essa área pertence à Floresta Nacional (FLONA) Saracá-Taquera. A UMF 1A foi concedida a empresa EBATA Produtos Florestais por meio de concessão florestal, concorrência N° 02/2012, promovida pelo SFB, nos termos da Lei n° 11.284/2006 e do Decreto n° 6.063/2007. A área de aplicação do estudo está localizada na UPA 04/2018, nas UTs 03, 04 e 05 (Figura 24).

Figura 24. Área de estudo



Fonte: O autor.

Os dados de inventário florestal censitário foram utilizados para obtenção das informações das árvores comerciais, tais como: diâmetro a altura do peito (DAP), altura comercial e identificação das espécies, qualidade do fuste e localização geográfica das árvores, por meio de receptor GNSS e, posteriormente, foi calculado o volume. Por fim, os dados foram processados e foram selecionadas as árvores comerciais classificadas como aptas para a exploração.

Foi construída uma malha com vértices nos locais aptos a receber os pátios de estocagem de madeira. Para isso, foi utilizado o *software* ArcGIS 10.3, em que foi realizada a distribuição uniforme de pontos equidistantes a 30 m. Esse valor é semelhante ao valor utilizado por Silva et al. (2018a). Visto que a área tem um relevo plano e suavemente ondulado, não há ocorrência de áreas inviáveis a instalação de infraestrutura. Houve somente a delimitação da APP como área inviável para alocação de pátios de estocagem (BRASIL, 2012).

Em função da localização das árvores e dos locais aptos a receber pátios, foram calculadas as distâncias tridimensionais de ligação árvore-pátio. Neste estudo,

denominada como distância 3D, utilizando o modelo digital de elevação (MDE) da missão SRTM, de 30 m de resolução espacial, em ambiente SIG. Para calcular a distância 3D, foi confeccionada uma malha regular de feições de linha sobre a área de estudo utilizando os pixels do *raster* do STRM e corrigida a distância horizontal em função da inclinação adquirida em cada seguimento de linha, em que a diferença de altitude foi obtida em cada pixel da imagem *raster* do SRTM conforme Ribeiro et al. (2017). Ao final deste processo, foi construída uma matriz ( $n \times m$ ) com as distâncias entre uma árvore  $i$  e todos os pátios  $j$ .

Foram definidas três instâncias para o processamento: instância 1 – UT-3 (820 árvores em uma área de 160,00 ha com 1.666 possíveis locais de instalação de pátios); instância 2 – UT-3 e 4 (1.864 árvores em uma área com 328,00 ha com 3.471 possíveis locais de instalação de pátios) e instância 3 – UT-3, 4 e 5 (3.172 árvores em uma área com 580,54 ha com 5.947 possíveis locais de instalação de pátios).

#### **4.2.2 Etapa 2 do fluxograma: Modelo de otimização e meta-heurísticas**

##### **4.2.2.1 Programação Linear Inteira Binária (PLIB)**

Inicialmente foi executado no *software* CPLEX um modelo PLIB, com o objetivo de adquirir informações do valor ótimo global para a comparação com os métodos heurísticos propostos. Posteriormente, o problema foi resolvido com as meta-heurísticas *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), *Tabu Search* (TS), *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Simulated Annealing* (SA). As meta-heurísticas foram processadas por meio de um programa de computador implementado em linguagem de programação Java na versão 8.

Para resolver o problema de localização ótima dos pátios de estocagem, foi adotado o problema clássico de  $p$ -medianas capacitado, com adição de restrição de distância máxima de arraste de tora, cujo objetivo é definir instalações que irão atender a determinados clientes em função de restrições específicas (DANESHZAND; SHOELEH, 2009; DREZNER; HAMACHER, 2009; KLOSE; DREXL, 2005; LORENA; SENNE, 2004; LUENBERGER; YE, 2008).

O modelo matemático clássico de  $p$ -medianas capacitado incluindo as restrições de volume máximo e distância máxima (SILVA et al., 2018a) pode ser descrito conforme a seguir:

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

Sujeito a:

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

$$\sum_{j=1}^P Y_j = p \quad (3)$$

$$x_{ij} - Y_j \leq 0; \quad \forall i, \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i x_{ij} \leq Q_j; \quad \forall i, \forall j \quad (5)$$

$$d_{ij} x_{ij} \leq Dmax; \quad \forall i, \forall j \quad (6)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\}; \quad \forall i, \forall j \quad (7)$$

Em que:  $i$  = árvores;  $j$  = pátios;  $P$  = número total de pátios passíveis de serem alocados;  $d_{ij}$  = custo de arraste da árvore  $i$  para o pátio  $j$ ;  $p$  = quantidade de pátios a serem efetivamente alocados ( $p \in P$ );  $x_{ij}$  = variável binária (0, 1) que assume o valor 1 caso a árvore  $i$  seja alocado no pátio  $j$ , e 0 em caso contrário;  $Y_j$  = variável binária (0, 1), assumindo o valor 1 caso o pátio seja selecionado e zero em caso contrário;  $q_i$  = volume da árvore  $i$ ;  $Q_j$  = capacidade máxima de volume suportado pelo pátio  $j$ ;  $Dmax$  = distância máxima de ligação entre a árvore  $i$  até o pátio  $j$ .

A função objetivo (FO) (1) minimiza o somatório dos custos de arraste das árvores aos pátios. A primeira restrição (2) garante que cada árvore não pode ser ligada a mais de um pátio. A segunda restrição (3) garante que de todos os possíveis pátios ( $P$ ) de serem selecionados, apenas um determinado número de pátios será selecionado ( $p$ ). Na prática, essa restrição garante que um número reduzido e pré-definido de pátios ( $p$ ) seja selecionado, isto é, a seleção de  $p$  dentro de  $P$ . A terceira restrição (4), associada com a segunda restrição (3), permite decidir quais serão os  $p$  pátios selecionados dentro de  $P$ . A quarta restrição (5) garante que a capacidade máxima do pátio ( $Q_j$ ) não seja ultrapassada; a restrição (6) garante que uma árvore  $i$  não seja arrastada a um pátio  $j$  além da distância máxima de ligação ( $Dmax$ ); e a restrição (7) garante que as variáveis de decisão sejam binárias.

#### 4.2.2.2 Solução inicial

Para obter a solução inicial para as meta-heurísticas *Tabu Search*, *Variable Neighborhood Search* e *Simulated Annealing*, foi implementada uma Heurística Construtiva Aleatória (HCA) para obter a solução inicial para a exploração da região

de soluções (GLOVER, 1986) conforme o código base apresentado na Figura 25. A HCA realiza um número  $n$  de iterações (linha 4), informado como parâmetro de entrada (linha 1). Para cada iteração, seleciona-se, aleatoriamente, um número  $n$  de pátios de estocagem (linha 5). O próximo passo é a comparação do valor da FO da solução atual, com a FO da melhor solução encontrada até o momento (linha 6). Se a solução atual possui melhor FO, então ela assume o papel de melhor solução (linha 7, 8). Caso contrário, é descartada. O último passo é o retorno da melhor solução encontrada (linha 11).

Figura 25. Pseudocódigo da HCA

1	HCA (numIter)
2	$mS \leftarrow \emptyset$
3	$mFO \leftarrow \infty$
4	<b>para</b> $i=1$ <b>até</b> numIter <b>faça</b>
5	$aS \leftarrow \text{obter}(\text{candidato})$
6	<b>se</b> $f(aS) < mFO$ <b>então</b>
7	$mS \leftarrow aS$
8	$mFO \leftarrow f(aS)$
9	<b>fim se</b>
10	<b>fim para</b>
11	<b>retorna</b> $mS$

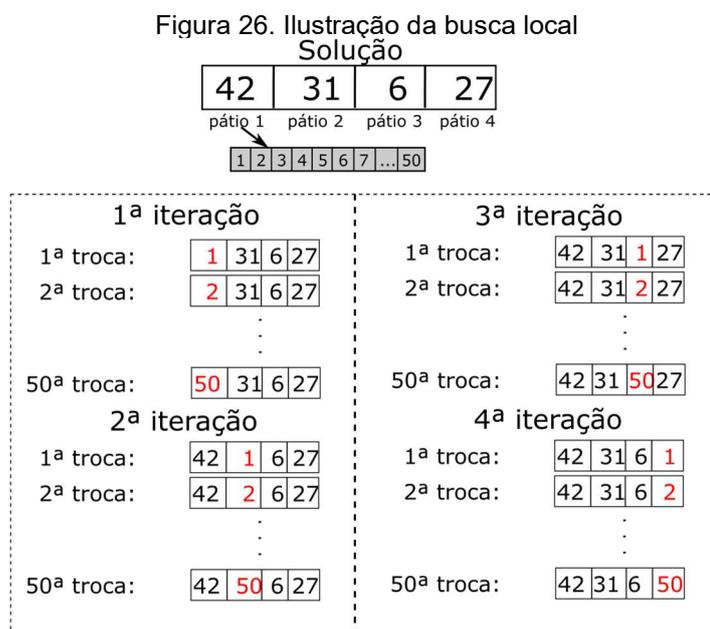
Fonte: Adaptado de Ziviani (2013, p. 59).

#### 4.2.2.3 Busca local

Para o método GRASP e o VNS, que serão detalhados adiante, foram implementadas duas heurísticas de busca local, *First improvement* e *Best improvement*. No método *Best improvement* a busca ocorre no espaço de soluções enquanto melhoras são obtidas. Já no método *First improvement*, a busca é interrompida ao encontrar a primeira melhora. Assim, neste estudo os dois métodos foram implementados com a mesma lógica de funcionamento na busca local, exceto pela regra de interrupção da busca (GONZALEZ, 2007).

No procedimento de busca, a heurística recebe uma solução, que é considerada como ponto de partida para a análise do espaço de soluções. Os pátios da solução inicial são visitados e, para cada pátio de estocagem de madeira visitado, faz-se a troca pelos pátios candidatos (possíveis pátios de estocagem). Para cada troca, o algoritmo realiza a alocação das árvores nos pátios da solução e calcula a função objetivo. Após o cálculo, verifica se a solução examinada é melhor que a solução inicial, e, caso seja, armazena a posição e o pátio que foram trocados. No

caso do *First improvement*, a busca é interrompida (GONZALEZ, 2007). A Figura 26 ilustra o procedimento.



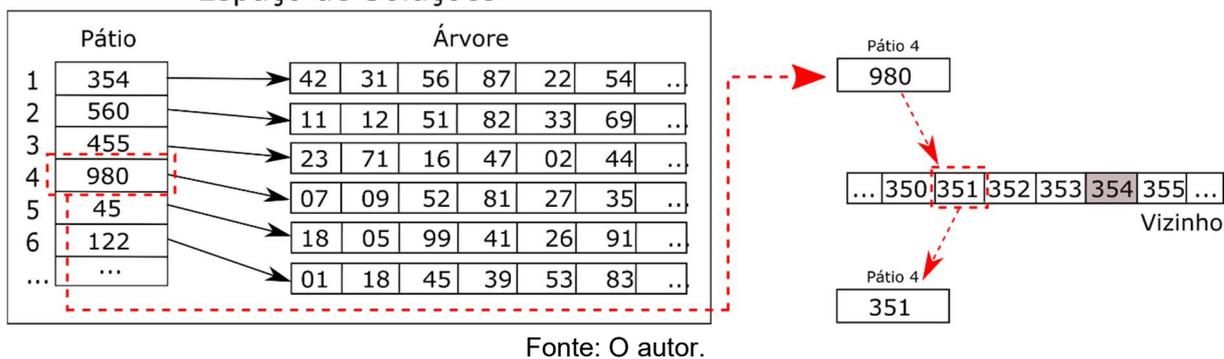
Fonte: O autor.

O exemplo (Figura 26) considera que a solução é formada por 4 pátios e que há 50 possíveis pátios. Assim, na primeira iteração o primeiro pátio da solução é trocado por todos os 50 possíveis pátios em busca de uma melhora. Na segunda iteração as trocas ocorrem novamente, mas agora elas são aplicadas ao segundo pátio da solução. Essas operações são repetidas até o pátio 4 da solução, no exemplo, o último.

#### 4.2.2.4 Solução vizinha

Para obter uma solução vizinha para o VNS e SA foi construída uma heurística que adota a estratégia da troca de um pátio de estocagem por outro pátio candidato. Assim, os vizinhos de uma solução dependem do espaço de soluções que está sendo avaliado. Um exemplo é apresentado a seguir (Figura 27). A solução do problema corresponde à matriz Solução contendo o melhor arranjo de pátios encontrado e as árvores alocadas em cada pátio.

Figura 27. Ilustração da obtenção de solução vizinha para o problema de alocação de pátios  
Espaço de Soluções



Um pátio é escolhido aleatoriamente para que as trocas de vizinhança ocorram entre ele e os candidatos. Na ilustração apresentada (Figura 27), o pátio sorteado foi o 4. Após o sorteio do pátio, ocorre um segundo sorteio, nesse caso, do candidato a vizinho. Nesse momento ocorre também uma verificação para evitar que pátios já selecionados sejam novamente escolhidos, isso pode ser observado no lado direito, em que na lista de vizinhos candidatos, o número 354 está representado com fundo cinza, o que indica que esse pátio não pode ser selecionado, pois já está na solução. Para manter a integridade da solução, após a troca do pátio, as árvores são novamente realocadas em cada pátio.

Para isso, a heurística responsável pela alocação das árvores nos pátios selecionados adota duas estratégias de escolha de árvores. A primeira estratégia é gulosa, em que, os pátios selecionados são visitados e para cada pátio são selecionadas as árvores mais próximas deste, considerando as seguintes validações: verifica se a capacidade do pátio não foi atingida, verifica se a árvore mais próxima está disponível para alocação, verifica se a árvore mais próxima cabe no pátio e se a distância de arraste não ultrapassa o máximo permitido. Se as restrições não forem violadas a árvore é alocada no pátio. Após a heurística alocar ou não a árvore, esse processo é repetido até que o pátio atinja a sua capacidade máxima.

Após esta operação de visita e alocação das árvores nos pátios, é possível que parte das árvores não tenha sido alocada em função das restrições de capacidade e distância de arraste. A heurística aplica então a segunda estratégia de escolha no conjunto de árvores restantes. Assim, as árvores que ainda não foram alocadas são visitadas e para cada uma delas é realizada uma comparação entre os pátios da solução para obter o pátio mais próximo da árvore. Após a seleção do pátio mais próximo a árvore é alocada no mesmo e a heurística avança para a

próxima árvore até que todas tenham sido alocadas. A restrição de distância máxima de arraste é, então, ignorada, pois é importante que todas as árvores sejam alocadas, contudo, a solução selecionada pode vir a se tornar inviável.

#### 4.2.2.5 Cálculo da FO

O cálculo da FO envolve realizar o somatório das distâncias das árvores associadas aos pátios. Para tratar as soluções com restrição violada, neste estudo, adotou-se a estratégia de penalização das soluções inviáveis, tendo em vista que, nesse caso, não há perda de desempenho no processamento. Para isso, foi utilizado um parâmetro, que pode ser calibrado, denominado como peso para penalização. Esse parâmetro permite definir um valor que é considerado no cálculo da penalização das soluções inviáveis, conforme a Equação 8.

$$R_{\omega}: \text{Min } cx + \omega(\max(0, e - D_x)) \quad (8)$$

Em que:  $R_{\omega}P: \text{Min } cx$  = penalização da função objetivo associada ao problema;  $\omega$  = fator de grandeza para a penalização;  $e$  = valor obtido para a restrição do problema;  $D_x$  = valor limite associado à restrição do problema.

#### 4.2.2.6 Greedy randomized adaptative search procedure (GRASP)

O GRASP (FEO; RESENDE, 1989) utilizado neste estudo pode ser entendido por meio do seu pseudocódigo (Figura 28). Inicialmente, o GRASP é executado por um determinado tempo, informado como parâmetro (linhas 1, 2, 5). A cada iteração, uma solução aleatória é gerada, de forma gulosa (linha 6). Na sequência, uma busca local é aplicada na solução gerada, com o objetivo de intensificar a procura por uma solução melhor (linha 7). A função  $f()$  (linha 11) é responsável por calcular a função objetivo da solução resultante da busca local.

Figura 28. Pseudocódigo do GRASP aplicado à alocação de pátios de estocagem

```

1  GRASP (tempoExec, LRC)
2  HoraTérmino ← horaAtual + tempoExec
3  mS ← ∅
4  mFO ← ∞
5  enquanto horaAtual < horaTérmino faça
6    aS ← constróiSolução(LRC)
7    aS ← buscaLocal(aS)
8    senão éViável(aS) então
9      realocaÁrvores(aS)
10   fim se
11   se f(aS) < mFO então
12     mS ← aS
13     mFO ← f(aS)
14   fim se
15 fim enquanto
16 retorna mS

```

Fonte: Adaptado de Glover e Kochenberger (2003, p. 220).

Caso a solução não atenda às restrições (capacidade de pátio e distância máxima de arraste), a heurística `realocaÁrvores()` realiza uma tentativa de adequação da solução para torna-la viável (linhas 8-10). Para isso, a heurística faz trocas sistemáticas de árvores alocadas que violaram a restrição de distância para pátios em que essa restrição não será violada. Esse procedimento é repetido até que todos os pátios sejam visitados e as árvores inviáveis sejam realocadas. Não há garantia que após o término deste procedimento será obtida uma solução viável.

Após a execução das etapas já mencionadas, o algoritmo verifica se a solução é melhor que a solução gerada na fase anterior. Em caso positivo, ela é armazenada como a melhor solução (linhas 11-14). Se a solução gerada é a primeira, então o algoritmo simplesmente armazena a solução para comparar com as próximas que serão geradas. Por fim, a heurística retorna a melhor solução encontrada durante o tempo de execução (linha 16).

#### 4.2.2.7 Tabu Search (TS)

A meta-heurística TS (GLOVER, 1986) aplicada ao problema de alocação de pátios de estocagem pode ser visualizada na Figura 29.

Figura 29. Pseudocódigo da TS aplicado ao problema de alocação de pátios de estocagem

```

1  TS(tempoExec,  $S_0$ ,  $k$ , BTmax)
2  horaTérmino  $\leftarrow$  horaAtual() + tempoExec
3   $mS \leftarrow S_0$ 
4   $\mathbf{T} \leftarrow \emptyset$ 
5   $mFO \leftarrow \infty$ 
6  enquanto horaAtual() < horaTérmino faça
7     $k \leftarrow 1$ 
8    enquanto ( $k < BTmax$ ) faça
9      aspirou  $\leftarrow 0$ 
10     obter(vizinho  $aS \in N(mS)$ )
11     se buscaListaTabu( $aS$ ) então
12       se  $f(aS) < f(mS)$  então
13          $pS \leftarrow aS$ 
14          $mFO \leftarrow f(aS)$ 
15         aspirou  $\leftarrow 1$ 
16          $k \leftarrow 1$ 
17       senão
18          $k \leftarrow k + 1$ 
19     fim se
20   senão
21     se  $f(aS) < mFO$  então
22        $pS \leftarrow aS$ 
23        $mFO \leftarrow f(aS)$ 
24        $k \leftarrow 1$ 
25     senão
26        $k \leftarrow k + 1$ 
27   fim se
28 fim se
29 fim enquanto
30  $aS \leftarrow pS$ 
31 senão éViável( $aS$ ) então
32   realocaÁrvores( $aS$ )
33 fim se
34 atualiza( $\mathbf{T}$ , aspirou)
35 se  $f(aS) < f(mS)$  então
36    $mS \leftarrow aS$ 
37 fim se
38 fim enquanto
39 retorna  $mS$ 

```

Fonte: Adaptado de Goldberg, Goldberg e Luna (2016, p. 89).

A TS é executada em um período de tempo informado por parâmetro (linhas 1, 2 e 6). A partir da solução inicial, soluções vizinhas são geradas com trocas sistemáticas de pátios de estocagem (linha 10) enquanto melhoras são obtidas (linhas 7, 12, 16, 21, 24). Para evitar revisitar as soluções, a TS utiliza uma lista,

denominada como lista Tabu. Ao longo da busca são armazenadas as soluções que forem aceitas (linha 34) e antes de realizar a comparação com a atual melhor solução, a TS consulta se a solução já está nessa lista (linha 11).

Se a solução já estiver na lista Tabu, então ela será aceita apenas se a FO for melhor do que a atual melhor solução (linhas 12-19). Caso não conste na lista Tabu, ela será aceita se a FO for melhor do que a melhor solução da atual busca (linhas 21-27). Após realizar a busca, a TS verifica se a solução encontrada é viável (linha 31) e, caso não seja, realiza-se uma tentativa de realocação das árvores para torná-la viável (linha 32). Na sequência, a lista Tabu é atualizada e a TS verifica se a solução encontrada na busca é melhor que a atual melhor solução. Caso seja, ela é aceita (linhas 35-37). No último passo, o resultado final é apresentado (linha 39).

#### 4.2.2.8 *Variable neighborhood search* (VNS)

A VNS (MLADENOVIC; HANSEN, 1997) (Figura 30) requer uma solução inicial que foi obtida com a HCA. Outro parâmetro de entrada (linhas 1 e 4) define o tempo de execução. Uma variável  $k$  e um parâmetro de entrada  $r$  são utilizados para garantir a intensificação em regiões promissoras e o abandono das não promissoras (linhas 1, 5, 6, 14, 16). A cada iteração, um vizinho é gerado com base na melhor solução até o momento (linha 7). Na sequência, uma busca local é aplicada à solução atual (linha 8). Caso a solução atual resultante não seja viável, o VNS realiza uma realocação com as árvores na tentativa de torná-la viável (linhas 9-11). Se, ao comparar a FO da solução atual à FO da melhor solução, o retorno for verdadeiro, a melhor solução é atualizada (linhas 12-17). O VNS conclui retornando a melhor solução (linha 20).

Figura 30. Pseudocódigo da VNS aplicado à alocação de pátios de estocagem

```

1 VNS(tempoExec,  $S_0$ , r)
2   horaTérmino  $\leftarrow$  horaAtual() + tempoExec
3    $mS \leftarrow S_0$ 
4   enquanto horaAtual() < horaTérmino faça
5      $k \leftarrow 1$ 
6     enquanto  $k \leq r$  faça
7       obter(vizinho  $nS \in N^*(mS)$ )
8        $aS \leftarrow$  buscaLocal( $nS$ )
9       senão éViável( $aS$ ) então
10        realocaÁrvores( $aS$ )
11      fim se
12      se  $f(aS) < f(mS)$  então
13         $mS \leftarrow aS$ 
14         $k \leftarrow 1$ 
15      senão
16         $k \leftarrow k + 1$ 
17      fim se
18    fim enquanto
19  fim enquanto
20  retorna  $mS$ 

```

Fonte: Adaptado de Silva e Urrutia (2010, p. 204).

#### 4.2.2.9 Simulated Annealing (SA)

O SA clássico mantém as iterações ativas por meio das temperaturas: inicial e de congelamento (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983). Neste estudo (Figura 31) foram utilizados esses dois parâmetros de entrada combinados com o tempo de execução (linhas 1, 2, 6, 7, 23). Além disso, foi implementado um mecanismo (*re-annealing*) que permite que a temperatura inicial seja reiniciada (linhas 24-26) sempre que ainda houver tempo de execução. O objetivo é permitir que o SA permaneça explorando a região de soluções se ainda houver tempo e que ele possa novamente voltar a escapar de ótimos locais, por meio do aumento da temperatura inicial.

Figura 31. Pseudocódigo do SA aplicado ao problema de alocação de pátios

```

1 SA(tempoExec,  $S_0$ ,  $T_0$ ,  $T_c$ ,  $SA_{max}$ ,  $\alpha$ )
2   horaTérmino  $\leftarrow$  horaAtual() + tempoExec
3    $mS \leftarrow S_0$ 
4    $IterT \leftarrow 0$ 
5    $T \leftarrow T_0$ 
6   enquanto  $T > T_c$  e horaAtual() < horaTérmino faça
7     enquanto  $IterT < SA_{max}$  e horaAtual() < horaTérmino faça
8        $IterT \leftarrow IterT + 1$ 
9       obter(vizinho  $aS \in N(S_0)$ )
10       $\Delta \leftarrow f(aS) - f(S_0)$ 
11      se  $\Delta < 0$  então
12         $S_0 \leftarrow aS$ 
13        se  $f(aS) < f(mS)$  então
14           $mS \leftarrow aS$ 
15        fim se
16      senão
17        random( $x \in [0, 1]$ )
18        se  $x < e^{-\Delta/T}$  então
19           $S_0 \leftarrow aS$ 
20        fim se
21      fim se
22    fim enquanto
23     $T \leftarrow \alpha \times T$ 
24    se  $T < (T_c + T_c * 2)$  e horaAtual() < horaTérmino então
25       $T \leftarrow T_0$ 
26    fim se
27     $IterT \leftarrow 0$ 
28  fim enquanto
29  retorna  $mS$ 

```

Fonte: Adaptado de Goldberg, Goldberg e Luna (2016, p. 110).

O segundo laço (linha 7) é responsável pelas iterações que farão a busca pelo estado em que será atingido o equilíbrio térmico do fenômeno natural representado pelo SA. Para atingir o equilíbrio térmico, primeiro gera-se um vizinho  $S'$  (linha 9). O passo seguinte é o cálculo da variação (linha 10). Se o valor da FO da solução vizinha for maior, então a variação  $\Delta$  será positiva, se for menor, o contrário. Se a variação é negativa, então melhorou, para um problema de minimização, nesse caso a solução  $aS$ , é aceita (linha 12). Na sequência, verifica-se se ela também é melhor que a solução global (linhas 13-15), se for, então ela é atualizada.

Mas, se a variação for positiva, a solução piorou, mas ainda é possível de ser aceita, caso a condição (linha 18) seja verdadeira. Então a solução corrente será

trocada pela solução vizinha (linha 19), mesmo ela sendo pior. Isso permitirá que o SA consiga escapar de ótimos locais.

### 4.2.3 Etapa 3 do fluxograma: Calibração dos parâmetros

As três instâncias construídas a partir da base de dados foram inicialmente solucionadas pelo método exato por meio do *software* ILOG CPLEX Optimization Studio 12.7.1®. A execução pelo método exato foi limitada ao tempo de 1.440 minutos (24 horas). Posteriormente, as instâncias foram solucionadas por meio das heurísticas propostas com tempo de processamento de 30 minutos. Para cada instância foram obtidas 30 soluções (repetições). O computador utilizado possui processador I7-4770k CPU 3,50GHz e 32GB de memória RAM.

Na definição dos parâmetros analisados, foram consideradas informações técnicas da área de manejo florestal como a quantidade de pátios, a capacidade dos pátios de estocagem e a distância máxima de arraste de toras. A quantidade de pátios foi estabelecida de acordo com a quantidade alocada no projeto original em cada UT. Foram alocados 14, 25 e 46 pátios de estocagem nas instâncias 1, 2 e 3, respectivamente. O volume máximo de cada pátio foi obtido pela divisão do volume total de cada instância pela quantidade de pátios a serem alocados. Para a flexibilização da solução, o valor da capacidade do pátio de estocagem foi acrescido em 10% em cada instância.

A distância máxima de arraste ( $D_{max}$ ) de 250 m comumente adotada em planejamentos florestais na floresta amazônica, leva em consideração a distância euclidiana ( $D_e$ ) de ligação da árvore ao pátio de estocagem. Porém, sabe-se que em campo nem sempre é possível o caminhamento em linha reta durante a atividade de arraste de toras de árvores (SILVA et al., 2018a). Por isso, é interessante obter uma matriz de distância 3D, que representa o menor caminho em função da correção da distância horizontal ( $D_h$ ) por meio da inclinação do terreno.

Para isso, foi ajustada uma regressão linear para estimar o valor da  $D_h$  considerando uma  $D_e$  de 250 m, com os valores da matriz de distância 3D. Foi realizado o ajuste da função, por meio de 4.999 observações. A equação obtida foi  $\widehat{D}_h = 92,5413 + 1,1477 D_e$ , com coeficiente de determinação ajustado de 94,54% e erro padrão da estimativa de 115,03 m. O valor estimado da  $D_h$  considerado como  $D_{max}$  nas instâncias analisadas foi de 379,45 m. Os parâmetros utilizados para o processamento das três instâncias são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de processamento da alocação de pátios de estocagem para 3 instâncias

Parâmetro	Instância 1	Instância 2	Instância 3
Área (ha)	160	328	580,54
N.º de árvores	820	1.864	3.172
Volume total (m <sup>3</sup> )	3.600,61	7.563,64	11.949,85
N.º de vértices para a possível alocação de pátios	1.666	3.471	5.947
Total de pátios que devem ser alocados	14	25	46
Capacidade dos pátios de estocagem (m <sup>3</sup> )	257,19	302,55	259,78
Flexibilização da capacidade (%)	10	10	10
Distância máxima para extração (m)	379,45	379,45	379,45
Penalização da função objetivo	1.000	1.000	1.000

Fonte: O autor.

As meta-heurísticas adotadas requerem a configuração de variados parâmetros. Em meta-heurísticas os parâmetros influenciam na forma como a busca é realizada no espaço de soluções, o que pode levar a melhores ou piores resultados. Assim, para que estes parâmetros não sejam escolhidos ao acaso, foi adotada a metodologia apresentada em Mauri et al. (2016).

Os parâmetros foram calibrados com o uso da instância 1 – UT-3, em que, para cada meta-heurística foram definidas faixas de valores para os parâmetros. As heurísticas foram executadas por cinco vezes por dez minutos para cada possível combinação desses parâmetros e a que produziu o melhor resultado médio foi adotada.

O GRASP requer a configuração do tamanho da Lista Restrita de Candidatos (LRC), definida neste estudo em termos percentuais da quantidade de pátios candidatos. Como já mencionado, neste estudo foram adotados dois métodos diferentes de busca local (*First improvement* e *Best improvement*) e, dessa forma, o método também foi calibrado. Em conjunto com o método de busca, foi calibrado também o número máximo de iterações sem melhora, que permite interromper a busca em um espaço de soluções não promissor. Os melhores valores obtidos com a calibração dos parâmetros do GRASP, bem como as faixas de valores adotados na calibração, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de entrada do GRASP para o problema de alocação de pátios de estocagem

Parâmetro	Faixa de valores	Valor adotado
LRC (%)	[10; 20; 30; 40; 50]	50
Método de busca local	[ <i>First improvement</i> ; <i>Best improvement</i> ]	<i>Best improvement</i>
Número máximo de iterações sem melhora	[200; 400; 600; não definido]	200
Tempo de execução (minutos)	-	30

Fonte: O autor.

A TS requer dois argumentos de entrada, o número máximo de iterações sem melhora e o tamanho da lista Tabu. Além disso, é preciso disponibilizar uma solução

inicial para que a TS realize a busca. Nesse caso, foi utilizada a Heurística Construtiva Aleatória (HCA) que requer um parâmetro de entrada, que é o número de iterações para a obtenção da solução inicial. Os melhores valores obtidos com a calibração dos parâmetros da TS são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de entrada da TS para o problema de alocação de pátios de estocagem

Parâmetro	Faixa de valores	Valor adotado
Tamanho da lista Tabu	[200; 400; 600; 800; 1.000]	400
N.º máximo de iterações sem melhora	[500; 1.000; 2.000]	2.000
Método de solução inicial	-	HCA
N.º de iterações para a solução inicial	-	20.000
Tempo de execução (minutos)	-	30

Fonte: O autor.

Para a meta-heurística VNS foram calibrados os parâmetros: número de estruturas de vizinhança diferentes; método de busca local e número máximo de iterações sem melhora (Tabela 4). Para a solução inicial foram adotados os mesmos parâmetros utilizados na TS.

Tabela 4. Parâmetros de entrada para o VNS para o problema de alocação de pátios de estocagem

Parâmetro	Faixa de valores	Valor adotado
N.º de estruturas de vizinhança diferentes	[600; 800; 1.000]	800
Método de busca local	[ <i>First improvement</i> ; <i>Best improvement</i> ]	<i>Best improvement</i>
N.º máximo de iterações sem melhora	[100; 200; não definido]	Não definido
Método de solução inicial	-	HCA
N.º de iterações para a solução inicial	-	20.000
Tempo de execução (minutos)	-	30

Fonte: O autor.

Para o SA foram calibrados os parâmetros Temperatura inicial; iterações de vizinhança e taxa de resfriamento. A solução inicial foi gerada nos mesmos moldes do VNS e da TS (Tabela 5).

Tabela 5. Parâmetros de entrada do SA para o problema de alocação de pátios de estocagem

Parâmetro	Faixa de valores	Valor adotado
Temperatura inicial	[1.000; 2.000; 3.000]	1.000
Temperatura de congelamento	-	0,001
Taxa de resfriamento	[0,975; 0,985; 0,999]	0,985
Iterações de vizinhança	[500; 1.000; 2.000]	500
Método de solução inicial	-	HCA
N.º de iterações para a solução inicial	-	20.000
Tempo de execução (minutos)	-	30

Fonte: O autor.

#### 4.2.4 Etapa 4 do fluxograma: Análise e resultados

Os resultados foram analisados considerando para cada instância e para cada técnica de solução a melhor solução encontrada [Melhor Sol (m)], a média dentre as FO encontradas [Média Sol (m)], o desvio das soluções [Desvio (%)], o

tempo de processamento computacional para encontrar a melhor solução [Tempo (minutos)], o tempo médio para obter a melhor solução [Tempo médio (minutos)] e o GAP (%). As médias foram calculadas apenas para as técnicas heurísticas com base em 30 execuções. O desvio das soluções foi calculado com a Equação 9 conforme a metodologia de Mauri et al. (2016). E o GAP foi calculado conforme a Equação 10.

(9)

$$Dev(\%) = \frac{\bar{x} - x_{melhor}}{x_{melho}} \times 100$$

Em que: Dev(%) = percentagem do desvio da melhor solução obtida em função da média das 30 execuções;  $\bar{x}$  = média das soluções encontradas (m);  $x_{melho}$  = melhor solução encontrada (m).

(10)

$$GAP = 100 \times \frac{Melhor_{metodo} - Melhor_{Cplex}}{Melhor_{Cplex}}$$

Em que: GAP = indica o intervalo das soluções encontradas para o CPLEX;  $Melhor_{metodo}$  = melhor solução obtida pelo método que está sendo comparado (m);  $Melhor_{Cplex}$  = melhor solução encontrada pelo CPLEX (m).

### 4.3 RESULTADOS

Os resultados computacionais foram resumidos na Tabela 6. É possível observar que o valor do GAP cresceu conforme houve o aumento do tamanho das instâncias. Embora os algoritmos de solução tenham obtido bons resultados, o contrário ocorreu com o GRASP cujo GAP se distanciou em 20% da melhor solução obtida pelo CPLEX. Dentre as meta-heurísticas, a melhor solução foi do algoritmo SA, seguido do VNS, mas que, contudo, na terceira instância obteve menor eficácia que a TS.

Tabela 6. Resultados computacionais para a alocação de pátios de estocagem

Instância	Método	Melhor Sol (m)	Média Sol (m)	Desvio (%)	Tempo (minutos)	Tempo médio (minutos)	GAP (%)
1	PLIB	103.789,91	-	-	125,24	-	0,01
	SA	<b>105.602,37</b>	105.936,26	<b>0,32</b>	05,22	14,23	<b>1,73</b>
	TS	107.135,43	112.401,45	4,92	01,06	02,92	3,13
	VNS	106.116,76	108.183,69	1,95	19,46	19,56	2,20
	GRASP	133.714,69	145.202,99	8,59	15,91	15,06	22,39
2	PLIB	255.738,73	-	-	1.440,05	-	0,18
	SA	<b>261.498,34</b>	263.705,69	<b>0,84</b>	04,30	18,69	<b>2,38</b>
	TS**	285.157,44	306.137,31	7,36	24,16	15,43	10,48
	VNS	272.442,43	288.479,42	5,89	29,11	29,49	6,30
	GRASP**	349.037,79	376.610,19	7,90	22,92	13,66	26,86
3	PLIB	461.037,47	-	-	1.440,07	-	8,91
	SA	<b>442.211,64</b>	446.283,81	<b>0,92</b>	18,18	18,32	<b>5,03</b>
	TS**	559.486,17	591.528,14	5,72	30,01	29,99	24,94
	VNS**	597.321,04	643.913,46	7,80	32,93	31,99	29,69
	GRASP**	640.586,26	675.321,95	5,42	3,80	16,38	34,44

Nota: - indica 'não reportado'; \*\* soluções que violaram alguma restrição, como apresentado na Tabela 7.

Fonte: O autor.

Quando analisada a eficácia na obtenção de soluções viáveis (Tabela 7), somente o SA foi capaz de obter soluções viáveis em todas as execuções para as três instâncias, ao passo que as demais meta-heurísticas não obtiveram soluções viáveis em todas as execuções da instância 1 (exceto o VNS), obtiveram poucas soluções viáveis na instância 2 e nenhuma solução viável na instância 3.

Tabela 7. Resumo de soluções viáveis para as instâncias

Instância	Método	N.º de Árvores	N.º de Soluções viáveis	Capacidade excedida (m <sup>3</sup> )	Nº de Árvores que excederam o limite (1)	Média de árvores que excederam o limite (2)	Média das maiores distâncias excedidas (m)
1	SA	820	30	0	0	0,00	0,00
	TS		29	0	0	0,03	69,77
	VNS		30	0	0	0,00	0,00
	GRASP		21	0	0	0,53	4,71
2	SA	1.864	30	0	0	0,00	0,00
	TS		3	0	2	8,67	51,31
	VNS		25	0	0	0,33	21,16
	GRASP		0	0	22	41,10	65,46
3	SA	3.172	30	0	0	0,00	0,00
	TS		0	0	13	35,20	39,21
	VNS		0	0	19	63,37	54,85
	GRASP		0	0	93	125,67	81,75

Nota: (1) – Nº de Árvores que excederam o limite de distância de arraste na melhor Solução; (2) – Média de árvores que excederam o limite de distância de arraste para todas as soluções obtidas

Fonte: O autor.

A quantidade de soluções viáveis é um importante indicador para aferir a capacidade do algoritmo em obter combinações viáveis dentro do espaço de

soluções e, os resultados obtidos nesses experimentos indicam que o SA foi a única meta-heurística eficiente neste aspecto.

#### 4.4 DISCUSSÃO

Estudos relacionados à alocação de pátios de estocagem, em geral, foram aplicados em áreas de manejo de pequeno tamanho (CONTRERAS; CHUNG, 2007; EZZATI et al., 2015; PHILIPPART et al., 2012; SILVA et al., 2018b). Claramente, há limitações de obtenção de valores exatos na solução de modelos matemáticos de programação linear inteira, por motivo do crescimento exponencial do número de variáveis. Isso pode ser observado em estudos que mostram o aumento da complexidade à medida que o número de variáveis cresce (FERNANDES et al., 2014; GUASTARROBA; SPERANZA, 2014; HO, 2015; STEFANELLO; ARAÚJO; MÜLLER, 2014; YAGHINI; KARIMI; RAHBAR, 2013). A esse respeito, a adoção de meta-heurísticas possibilitou a obtenção de soluções viáveis para o problema apresentado.

É possível observar que para a instância 1, de menor dimensão, o CPLEX encontrou uma solução com FO no valor de 103.789,91, em 125,24 minutos de processamento. Ao observar os mesmos valores para as heurísticas, nota-se que, três meta-heurísticas obtiveram valores próximos: SA, VNS e TS, em que o GAP obtido se aproxima do esperado, ou seja, da melhor solução conhecida. Além disso, todas as soluções obtidas são viáveis, atendendo às restrições impostas, mesmo a que foi obtida pelo GRASP, que apresentou pior desempenho com um GAP de 22,39% do resultado ótimo (Tabela 6).

Apesar do SA ter encontrado uma solução com GAP em relação à melhor solução conhecida para a primeira instância (Tabela 6), é importante destacar que o tempo de processamento necessário para o SA obter a melhor FO foi de 5,22 minutos. Dessa forma, duas considerações podem ser feitas: a primeira refere-se ao fato de que o tempo é inferior ( $\cong 95\%$ ) ao tempo exigido para o processamento pelo CPLEX, o que pode justificar o uso da solução com valor próximo do ótimo.

Outra consideração refere-se ao tempo de execução de 30 minutos para as meta-heurísticas, pois conforme reportado (Tabela 6), em média, o SA obteve soluções melhores em até 14,23 minutos de processamento, o que pode indicar que a busca está ficando presa em um ótimo local, considerando que a melhor solução

obtida não é a ótima. Uma alternativa é pesquisar alternativas para a geração de soluções vizinhas que criem condições para que o SA escape dos mínimos locais.

As meta-heurísticas VNS e TS também tiveram os resultados processados em tempo similar ao SA. Em relação ao desvio, nota-se que o SA é a única meta-heurística que apresentou um valor inferior a 1% para todas as instâncias. Assim, um desvio reduzido das respostas encontradas pelo SA, indica que a técnica é estável em produzir respostas, isto é, as respostas variam pouco, sendo, portanto, mais confiáveis. No caso deste estudo, pode-se dizer que em menos de 1% das execuções realizadas para o SA serão obtidas respostas diferentes da média obtida.

Para a segunda instância, o CPLEX obteve valor de FO próximo do ótimo, com GAP de 0,18%, mas, para a instância 3, o *software* não foi capaz de obter um bom resultado e se limitou ao valor 461.037,47 para a FO com GAP de 8,91%, após executar por 24 horas. Nesse caso, o SA foi capaz de obter um valor de FO igual a 442.211,64 com GAP de 5,03% em aproximadamente 18 minutos, ou seja, obteve um resultado melhor que o CPLEX em menor tempo. Por outro lado, as demais meta-heurísticas perderam qualidade à medida que a dimensão das instâncias aumentou.

A meta-heurística SA também se mostrou eficiente em obter soluções viáveis (Tabela 7). A restrição de distância promoveu uma limitação maior na busca da solução quando comparada à restrição de volume do pátio. Essa característica também foi relatada na pesquisa de Silva et al. (2018a). As heurísticas foram eficientes em construir soluções em que a capacidade dos pátios foi atendida. Por outro lado, quando ocorreu violação de restrição foi na distância de arraste.

Para a segunda instância, as soluções obtidas pela TS e pelo GRASP com melhor FO foram inviáveis (Tabela 7). Isso ocorreu porque em ambos os casos o número de árvores que violaram a restrição de distância de arraste foi maior que zero. Contudo, em todos os cenários, não houve violação da restrição de capacidade do pátio de estocagem.

É importante destacar que, mesmo nos casos em que ocorreu a violação da distância máxima de arraste, deve-se considerar que, em termos práticos, tais violações não inviabilizam a operação de manejo, caso tal solução seja adotada, pois o número de árvores que excederam a distância máxima na pior solução representou apenas 2,93% do total de árvores (instância 3, GRASP). Além disso, à

distância média excedida foi de 12,79% do valor de distância máxima permitida para o arraste de toras de 379,45 m (Tabela 7).

As meta-heurísticas VNS e GRASP requerem o uso de busca local na etapa de refinamento. É possível que a busca local *Best improvement* adotada não tenha sido eficiente em percorrer o espaço de busca, limitando assim a exploração de soluções de boa qualidade. Os melhores resultados do VNS em relação ao GRASP, provavelmente são explicados pela sua capacidade adicional em realizar trocas por soluções vizinhas.

No caso da TS, o desempenho ruim possivelmente ocorreu pela ineficiência na estratégia adotada para a intensificação na busca. Em todos os casos, a realização de testes com o uso de outras heurísticas de busca local e avaliação de vizinhança podem evidenciar melhor tais suposições (DIB; MANIER; CAMINADA, 2015; FRANÇA; SOSA; PUREZA, 1999; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; HO, 2015; YAGHINI; KARIMI; RAHBAR, 2013).

#### 4.5 CONCLUSÃO

Em geral, as meta-heurísticas foram eficientes em obter soluções viáveis em tempo inferior ao CPLEX, o que representa a viabilidade do planejamento de alocação de pátios de estocagem em áreas extensas, e sem perdas significativas de exatidão do valor ótimo da solução do problema.

A meta-heurística SA obteve o melhor desempenho, seguida da VNS, TS e o pior desempenho foi do algoritmo GRASP, em relação ao problema de planejamento analisado. Na terceira e maior instância o método SA foi a única meta-heurística a obter soluções viáveis e de melhor qualidade, quando comparada ao CPLEX.

#### 4.6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2, p. 145–173, 2005. ISSN 0304-3800. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.059>>.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**, Brasília, DF, maio 2012.

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**, v. 37, n. 2, p. 276–292, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/x06-219>>.

DANESHZAND, F.; SHOELEH, R. Multifacility location problem. In: FARAHANI, R. Z.; HEKMATFAR, M. (Ed.). **Facility location**. New York, NY, USA: Springer International Publishing, 2009.

DIB, O.; MANIER, M.-A.; CAMINADA, A. Memetic algorithm for computing shortest paths in multimodal transportation networks. **Transportation Research Procedia**, v. 10, p. 745–755, 2015. ISSN 2352-1465. 18<sup>th</sup> Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 14-16 July 2015, Delft, The Netherlands.

DREZNER, Z.; HAMACHER, H. W. **Facility Location**. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2009.

EZZATI, S.; NAJAFI, A.; YAGHINI, M.; HASHEMI, A. A.; BETTINGER, P. An optimization model to solve skidding problem in steep slope terrain. **Journal of Forest Economics**, v. 21, n. 4, p. 250–268, 2015. ISSN 1104-6899. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfe.2015.10.001>>.

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. **Operations Research Letters**, Amsterdam, Netherlands, v. 8, n. 2, p. 67–71, abr. 1989. ISSN 0167-6377. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0167-6377\(89\)90002-3](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6377(89)90002-3)>.

FERNANDES, D. R.; ROCHA, C.; ALOISE, D.; RIBEIRO, G. M.; SANTOS, E. M.; SILVA, A. A simple and effective genetic algorithm for the two-stage capacitated facility location problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 75, p. 200–208, 2014. ISSN 0360-8352. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.05.023>>.

FRANÇA, P. M.; SOSA, N. M.; PUREZA, V. An adaptive Tabu search algorithm for the capacitated clustering problem. **International Transactions in Operational Research**, Hoboken, NJ, USA, v. 6, n. 6, p. 665–678, mai. 1999. ISSN 0969-6016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.1999.tb00180.x>>.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986. ISSN 0305-0548.

- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. 1. Ed. New York, NY, USA: Kluwer Academic Publishers, 2003. 570 p. ISBN 0-306-48056-5.
- GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e meta-heurísticas: algoritmos e aplicações**. 1. Ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2016. 416 p. ISBN 978-85-352-7812-5.
- GONZALEZ, T. F. **Handbook of approximation algorithms and metaheuristics**. 1. Ed. Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall, 2007. 1427 p. ISBN 978-1-58488-550-4.
- GUASTAROBA, G.; SPERANZA, M. A heuristic for BILP problems: The single source capacitated facility location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 238, n. 2, p. 438–450, 2014. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.007>>.
- HO, S. C. An iterated Tabu search heuristic for the single source capacitated facility location problem. **Applied Soft Computing**, v. 27, p. 169–178, 2015. ISSN 1568-4946. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.11.004>>.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, Washington, DC, USA, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. ISSN 0036-8075. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1690046>>.
- KLOSE, A.; DREXL, A. Facility location models for distribution system design. **European Journal of Operational Research**, v. 162, n. 1, p. 4–29, 2005. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.10.031>>.
- LIU, K.; SESSIONS, J. Preliminary planning of road systems using digital terrain models. **International Journal of Forest Engineering**, v. 4, n. 2, 1993. ISSN 1913-2220. Disponível em: <<https://journals.lib.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/10052>>.
- LORENA, L. A. N.; SENNE, E. L. F. A column generation approach to capacitated p-median problems. **Computers & Operations Research**, v. 31, n. 6, p. 863–876, 2004. ISSN 0305-0548. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(03\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00039-X)>.
- LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 3. Ed. New York, NY, USA: Springer International Publishing, 2008. 546 p. ISBN 978-0-387-74502-2.
- MAURI, G. R.; RIBEIRO, G. M.; LORENA, L. A. N.; LAPORTE, G. An adaptive large neighborhood search for the discrete and continuous berth allocation problem. **Computers & Operations Research**, v. 70, p. 140–154, 2016. ISSN 0305-0548. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.002>>.
- MLADENOVIĆ, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. **Computers & Operations Research**, Oxford, England, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, abr. 1997. ISSN 0305-0548.

MONTOYA, M. R.; LORANCA, M. B. B.; VELÁZQUEZ, R. G.; FLORES, J. L. M.; SANTOS, H. B.; FLORES, A. S.; SANTIESTEBAN, F. M. A solution proposal for the capacitated p-median problem with tabu search. **Research in Computing Science**, v. 121, p. 59–67, 2016.

NEWNHAM, R. M. ROADPLAN: A Tool for Designing Forest Road Networks. **International Journal of Forest Engineering**, v. 6, n. 2, jan. 1995.

PHILIPPART, J.; SUN, M.; DOUCET, J.-L.; LEJEUNE, P. Mathematical formulation and exact solution for landing location problem in tropical forest selective logging, a case study in southeast Cameroon. **Journal of Forest Economics**, v. 18, n. 2, p. 113–122, 2012. ISSN 1104-6899. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfe.2011.11.002>>.

RIBEIRO, C. A. A. S.; MARCATTI, G. E.; MUNARETTI, A. M.; SILVA, K. E. da; ALMEIDA, D. R. A. de; VASCONCELOS, R. dos S.; NETO, E. L. V. **Otimização do traçado de trilhas para acesso a recursos florestais naturais**. Manaus, AM: Embrapa Amazônia Ocidental, 2017. 99 p. ISSN 1517-3135.

SANTOSA, B.; KRESNA, I. G. N. A. Simulated annealing to solve single stage capacitated warehouse location problem. **Procedia manufacturing**, v. 4, p. 62–70, 2015. ISSN 2351-9789. Industrial Engineering and Service Science 2015, IESS 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.015>>.

SILVA, E. F. da; SILVA, G. F. da; FIGUEIREDO, E. O.; BINOTI, D. H. B.; MENDONÇA, A. R. de; TORRES, C. M. M. E.; PEZZOPANE, J. E. M. Allocation of storage yards in management plans in the Amazon by means of mathematical programming. **Forests**, Basel, Switzerland, v. 9, n. 3, p. 1–20, mar. 2018. ISSN 1999-4907. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f9030127>>.

SILVA, P. H. da; GOMIDE, L. R.; FIGUEIREDO, E. O.; CARVALHO, L. M. T. de; FERRAZ-FILHO, A. C. Optimal selective logging regime and log landing location models: a case study in the Amazon forest. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 48, n. 1, p. 18–27, mar. 2018. ISSN 0044-5967. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201603113>>.

SILVA, R. F. da; URRUTIA, S. A general VNS heuristic for the traveling salesman problem with time windows. **Discrete Optimization**, Amsterdam, Netherlands, v. 7, n. 4, p. 203–211, nov. 2010. ISSN 1572-5286. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.disopt.2010.04.002>>.

STEFANELLO, F.; ARAÚJO, O. C. B.; MÜLLER, F. M. Matheuristics for the capacitated p-median problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 22, n. 1, p. 149–167, 2014.

SØVDE, N. E.; LØKKETANGEN, A.; TALBOT, B. Applicability of the grasp metaheuristic method in designing machine trail layout. **Forest Science and Technology**, Taylor & Francis, v. 9, n. 4, p. 187–194, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/21580103.2013.839279>>.

YAGHINI, M.; KARIMI, M.; RAHBAR, M. A hybrid metaheuristic approach for the capacitated p-median problem. **Applied Soft Computing**, Elsevier Science

Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 13, n. 9, p. 3922–3930, 2013. ISSN 1568-4946. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2013.04.009>>.

ZIVIANI, N. **Projeto de algoritmos**: com implementações em pascal e c. 3. ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2013. 639 p. ISBN 978-85-221-1050-6.

## 5 CAPÍTULO 2 - DEFINIÇÃO ÓTIMA DO TRAÇADO DE ESTRADAS FLORESTAIS EM ÁREA DE MFS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

### RESUMO

O planejamento ótimo do traçado de estradas florestais com o objetivo de reduzir a densidade, mas adotando práticas, como: o desvio de APPs, de árvores remanescentes, de nascentes e o aproveitamento do relevo natural, é fundamental para favorecer a redução de custos e danos à floresta remanescente. Contudo, a complexidade deste planejamento é alta, em função das variáveis envolvidas no problema. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a definição do traçado de estradas florestais por meio de solução exata e meta-heurísticas em uma área de manejo florestal. A área de estudo foi uma floresta nativa sob regime de manejo florestal sustentável localizada na Amazônia brasileira. Foram formuladas três instâncias para a solução. Foi utilizado um modelo de programação linear inteira binária solucionado pelo *software* CPLEX, o algoritmo Dijkstra e por método aproximativo com as meta-heurísticas *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Simulated Annealing* (SA). Foi observado que o tempo consumido de processamento aumenta de acordo com o tamanho da instância, contudo a diferença de tempo não é considerável. Embora, o SA e o VNS tenham obtido soluções de qualidade, o *software* CPLEX e o Dijkstra superaram em desempenho e qualidade as meta-heurísticas. No resultado geral o Dijkstra teve melhor desempenho que os demais métodos avaliados.

**Palavras-chave:** Meta-heurísticas; Estradas florestais; Sistemas de informação geográfica; Floresta tropical; Otimização do planejamento.

## CHAPTER 2 – OPTIMAL ALIGNMENT OF FOREST ROAD IN MFS AREA IN BRAZILIAN AMAZON

### ABSTRACT

The optimal planning of forest road layout with the objective reducing density, but adopting practices such as: avoid APPs, remaining trees, water springs and use natural relief, is fundamental to favor the reduction of costs and damage to remaining forest. However, the complexity of this planning is high, due to the variables involved in the problem. The objective of this research was evaluate the definition forest road layout by exact solution and metaheuristics in a forest management area. The study area was a native forest under sustainable forest management regime located in the Brazilian Amazon. Three instances were formulated for solution. We used a binary integer linear programming model solved by the CPLEX software, the Dijkstra algorithm and by approximate method with the Variable Neighborhood Search (VNS) and Simulated Annealing (SA) metaheuristics. It has been observed that consumed processing time increases with size of instance, however time difference is not considerable. Although SA and VNS achieved quality solutions, CPLEX software and Dijkstra outperformed metaheuristics in performance and quality. In the overall result, Dijkstra performed better than the other methods evaluated.

**Keywords:** Metaheuristics; Forest roads; Geographic information system; Tropical forest; optimized planning.

## 5.1 INTRODUÇÃO

Dentre as práticas previstas no MFS, várias são associadas às infraestruturas florestais, como: a definição de largura de estradas e trilhas, do tamanho de pátios de estocagem, do uso de máquinas na construção de tais infraestruturas, entre outras. Estas práticas objetivam a redução dos danos causados à floresta remanescente, como a abertura de área, a fragmentação florestal, a compactação do solo e outras (ARIMA et al., 2008; AMARAL et al., 1998; BRAZ et al., 1998; ESPADA et al., 2013; PINARD et al., 1995; SABOGAL et al., 2006; SILVA et al., 2018; SIST, 2000).

Apesar dos benefícios já obtidos com as práticas do MFS, há espaço para a melhora nas técnicas de manejo sustentável, como é o caso da substituição do modelo sistemático na definição do traçado de estradas. Tal modelo tem se mostrado ineficaz em relação ao planejamento, pois a característica comum de florestas nativas é a heterogeneidade de espécies, de distribuição espacial, de volume, a presença de áreas de preservação permanente, de indivíduos protegidos por lei, dentre outras questões que tornam o planejamento sistemático inviável de aplicação em campo e desfavorável aos custos do projeto e aos danos causados à floresta remanescente (AKAY, 2006; BRAZ, 2002, 2005; EZZATI et al., 2015; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; MACHADO, 2013; PINARD et al., 1995; SESSIONS et al., 2007; SILVA et al., 2018; SIST, 2000).

É de suma importância determinar o traçado de estradas florestais, sejam elas de acesso, primárias, secundárias ou trilhas, com o objetivo de reduzir a densidade, mas observando as características da floresta que requerem a adoção de práticas, como: o desvio de áreas impróprias e inaptas, de árvores matrizes e remanescentes, de árvores protegidas por lei, de nascentes e o aproveitamento do relevo natural. Ao considerar estes fatores no planejamento o engenheiro florestal potencializa as chances de obter um plano tecnicamente e economicamente viável de aplicação.

Tradicionalmente, o planejamento de infraestruturas, realizado para a aplicação do MFS na Amazônia Brasileira, é manual e com base em mapas topográficos e na experiência do engenheiro florestal (SILVA et al., 2018). Em geral, o planejamento manual demanda muito tempo e com isso a necessidade de decisões de curto prazo é afetada. Além disso, o número de cenários e combinações

que devem ser avaliados é grande, levando muitas vezes o gestor a não se ater a todos os detalhes necessários.

Uma alternativa para obter a menor densidade no traçado de estradas ao realizar o planejamento das infraestruturas é o emprego de métodos computacionais, como: a programação matemática e meta-heurísticas. Pode ser adotado o modelo matemático e algoritmos existentes associados ao problema de caminho mínimo (PCM), também denominado como problema de caminho mais curto (PCMC). Esse problema é estudado por meio de algoritmos e meta-heurísticas (ARIMA et al., 2008; CONTRERAS; CHUNG, 2007; EZZATI et al., 2015; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; GONZALEZ, 2007; MARCATTI, 2017; PICARD; GAZULL; FREYCON, 2006; WALKER et al., 2013).

Tendo em vista que o problema se enquadra na classe de difícil solução e a realidade encontrada na exploração de madeira em floresta nativa envolve o planejamento da exploração em grandes áreas de MFS, o objetivo deste estudo foi avaliar a determinação do traçado de estradas florestais por meio de solução exata e meta-heurísticas em uma área de manejo florestal na Amazônia brasileira.

## 5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O esquema metodológico (Figura 32) representa as etapas necessárias para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Figura 32. Fluxograma metodológico de processamento dos métodos de solução para o problema de traçado de estradas florestais

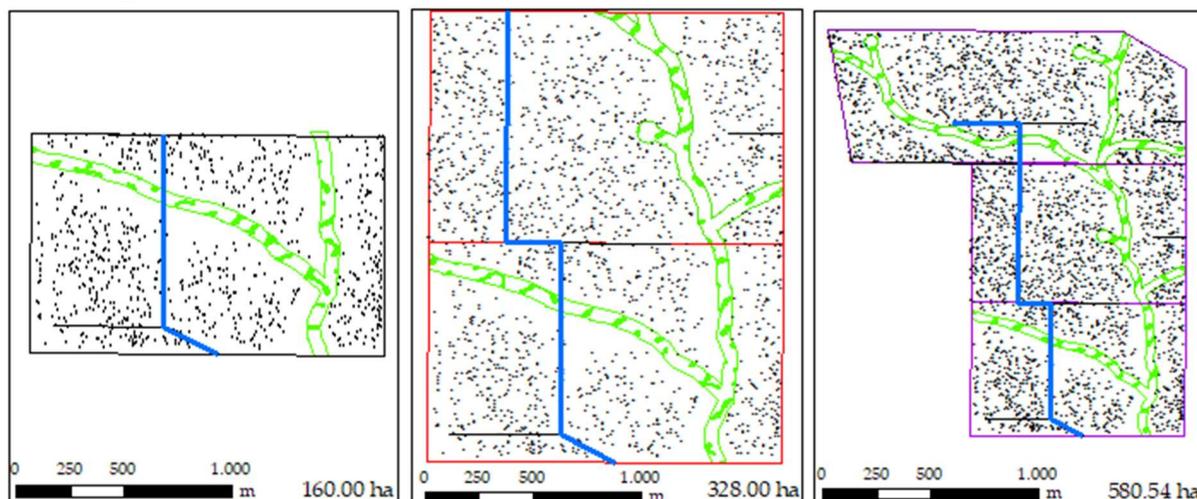


Fonte: O autor.

### 5.2.1 Etapa 1 do fluxograma: Formação da base de dados

Para avaliar os métodos de solução, foi utilizada como área de estudo, a Unidade de Manejo Florestal (UMF) 1A, que possui 26.897,96 hectares e está localizada na coordenada geográfica 1°45'23" S e 56°34'21" W, situada nos municípios de Terra Santa e Oriximiná, Pará. Esta área pertence à Floresta Nacional (FLONA) Saracá-Taquera. A UMF 1A foi concedida a empresa EBATA Produtos Florestais por meio de concessão florestal, concorrência N° 02/2012, promovida pelo Serviço Florestal Brasileiro, nos termos da Lei n° 11.284/2006 e do Decreto n° 6.063/2007. A área de aplicação do estudo está localizada na UPA 04/2018, nas UTs 03, 04 e 05 (Figura 33).

Figura 33. Área de estudo utilizada para o problema do traçado de estradas florestais



### Legenda

-  Instância 1 - UT-3; 559 árvores remanescentes e 15,13 ha de área de APP
-  Instância 2 - UT-3,4; 1.353 árvores remanescentes, 1 nascente e 26,68 ha de área de APP
-  Instância 3 - UT-3,4,5; 2.424 árvores remanescentes, 3 nascentes e 53,57 ha de área de APP
-  APP
-  Árvores selecionadas para corte
-  Trecho do traçado planejado adotado neste estudo
-  Demais trechos de estrada planejadas



Sistema de Coordenadas Geográficas  
Datum: SIRGAS 2000

Fonte: O autor.

A área de estudo é a mesma que foi adotada no estudo de alocação de pátios de estocagem (Capítulo 3) e, portanto, dispõe dos dados provenientes do inventário florestal censitário, tais como: diâmetro a altura do peito (DAP), altura comercial e identificação das espécies, qualidade do fuste, localização geográfica das árvores e o volume. Além disso, dispõe dos dados de planejamento de estradas primárias realizado pela empresa EBATA Produtos Florestais.

O problema de determinar o traçado de uma estrada com o objetivo de reduzir a densidade e conseqüentemente reduzir os danos à floresta se enquadra em um problema clássico denominado como problema de caminho mínimo (PCM), que se refere à obtenção do caminho mais curto entre dois vértices de um grafo. O PCM pode ser descrito da seguinte forma: sendo  $i$  e  $d$  dois vértices do grafo  $G = \{N, M\}$ , em que  $N = \{1, \dots, n\}$  representa o conjunto de vértices do grafo e  $M = \{1, \dots, m\}$  representa o conjunto de arestas, o caminho mínimo entre  $i$  e  $d$  é uma seqüência de arestas, que liga  $i$  a  $d$ , passando por vértices distintos, acumulando a menor distância (GOLDBARG; GOLDBARG; LOUREIRO, 2016; GOLDBARG; LOUREIRO, 2005).

Dessa forma, para representar o grafo necessário ao problema, foi construída uma malha com vértices na área das UTs que fazem parte do banco de dados. Para isso, foi utilizado o *software* ArcGIS 10.3, em que foi realizada a distribuição uniforme de pontos equidistantes a 30 m. Para calcular a distância 3D, foi confeccionada uma malha regular de feições de linha sobre a área de estudo utilizando os pixels do *raster* do STRM e corrigida a distância horizontal em função da inclinação adquirida em cada seguimento de linha, em que a diferença de altitude foi adquirida em cada pixel da imagem *raster* do SRTM conforme Ribeiro et al. (2017).

As unidades de trabalho, UT-3, UT-4 e UT-5, da UMF 1A foram utilizadas para formar 3 instâncias (Figura 33 e Tabela 8). A combinação entre as unidades de trabalho para formar as instâncias teve dois objetivos: primeiro, demonstrar que é possível realizar o planejamento em nível de UPA (áreas extensas); e segundo formar instâncias maiores para avaliar o desempenho dos métodos implementados.

Tabela 8. Resumo das instâncias formadas a partir das unidades de trabalho para o problema de alocação de estradas florestais

Dados	Instância		
	1	2	3
Unidades de trabalho	UT-3	UT-3 UT-4	UT-3 UT-4 UT-5
Árvores exploráveis	820	1.864	3.172
Árvores remanescentes	559	1.353	2.424
Nascentes identificadas	0	1	3
Tamanho da área (ha)	160	328	580,54
Tamanho da área de APP	15,13	26,68	53,57
Total de vértices*	1.836	3.726	6.548
Total de arestas*	14.164	29.074	51.268

\* Na teoria dos grafos os vértices são nós utilizados para a representação de objetos no mundo real e as arestas são as ligações entre os vértices.

Fonte: O autor.

No planejamento das estradas florestais foram adotados os mesmos pontos de início e término obtidos no planejamento realizado pela empresa florestal para fins de comparação entre os métodos. Contudo, como o objetivo é avaliar os métodos de solução quanto a sua eficácia e eficiência no planejamento do traçado de estradas para a exploração em floresta nativa, foi considerado apenas um trecho de estrada, o de maior extensão, por UT (Figura 33 e Tabela 9).

Tabela 9. Pontos de início e término adotados no planejamento de estradas primárias conforme planejamento realizado pela empresa EBATA

UT	Posicionamento geográfico		Extensão (m)
	Início	Término	
UT-3	1°49'51.913"S 56°33'9.884"W	1°49'19.672"S 56°33'17.660"W	1.199,50
UT-3; UT-4	1°49'51.913"S 56°33'9.884"W	1°48'45.477"S 56°33'26.408"W	2.513,56
UT-3; UT-4; UT-5	1°49'51.913"S 56°33'9.884"W	1°48'35.710"S 56°33'42.012"W	3.339,09

Nota: As coordenadas geográficas e a extensão foram obtidas por meio de um SIG.

Fonte: O autor.

Para determinar o traçado de estradas para a área de estudo, foi construído um programa de computador em linguagem C versão ISO/IEC 9899:2011. A primeira etapa do programa realiza um pré-processamento (Figura 34) cuja finalidade é: importar os dados do grafo referente à área da instância, importar os dados do inventário florestal (árvores remanescentes, protegidas por lei, nascentes e APPs), importar os dados de relevo, calcular as distâncias euclidianas entre os vértices e demais conjuntos de informações, e cruzar as informações dos vértices e arestas do grafo com as informações de inventário florestal.

Figura 34. Pseudocódigo do pré-processamento de determinação do traçado de estradas

```

1 ar ← lerInstanciaGrafoArea(arquivoAG)
2 arvRem ← lerInstanciaArvoresRemanescentes(arquivoAR)
3 nasc ← lerInstanciaNascentes(arquivoN)
4 app ← lerInstanciaAPP(arquivoAPP)
5 relevo ← lerInstanciaRelevo(arquivoRelevo)
6 estradasPrimarias ← lerPontosEstradasPrimarias(pontosEP)
7
8 gr ← criaGrafo(ar)
9 insereArestasGrafo(gr, arvRem, nasc, app)

```

Fonte: O autor.

As primeiras instruções do pré-processamento (Figura 34) são responsáveis pela importação dos dados do inventário florestal censitário para o ambiente de processamento do programa (linhas 1 a 4). A seguir são importados os dados de relevo da área contendo a inclinação do terreno e as áreas suscetíveis a alagamento (linha 5). Na sequência são importados os pontos que indicam o início e o término da estrada primária que deve ser planejada (linha 6), conforme a Tabela 9. A etapa seguinte é a construção da estrutura de dados do grafo com base nos vértices importados e na distância entre os vértices (linhas 8 e 9).

A função `insereArestasGrafo()` se baseia na distância entre os vértices para determinar quais são os vértices vizinhos de um vértice  $i$  e para cada vértice

identificado como vizinho de  $i$ , é criada uma aresta de ligação entre os dois vértices. Para o cálculo da distância foi utilizada a distância 3D conforme metodologia empregada em Ribeiro et al. (2017).

Essa distância considera a altitude, o que permite obter maior precisão ao calcular a distância entre dois pontos, tendo em vista que normalmente os terrenos apresentam algum grau de declividade. Assim, ao determinar o caminho de menor comprimento, o método, seja ele programação matemática ou meta-heurística, evitará naturalmente as áreas de declividade acentuada, uma vez que, nesses casos a distância será maior.

### 5.2.2 Etapa 2 do fluxograma: Definição das restrições

Ao realizar a abertura de estradas florestais deve-se observar a manutenção de nascentes e de árvores remanescentes, como: árvores porta-sementes, árvores protegidas por lei, árvores com ninho e árvores comerciais que ainda não atingiram o DAP mínimo. Além disso, deve-se também evitar transpor as áreas de preservação permanente (APP) (AMARAL et al., 1998; ESPADA et al., 2013; FFT, 2002; SILVA et al., 2018). Os dados de inventário florestal referentes à estas áreas e obstáculos foram processados com o objetivo de disponibilizar aos métodos avaliados as informações necessárias para a sua manutenção.

Além disso, para a exploração em florestas nativas, ao construir estradas deve-se observar o relevo, pois áreas muito íngremes, acima de 45° de inclinação, são consideradas APPs e áreas muito baixas favorecem o acúmulo de água, o que prejudica a atividade de transporte. Deve-se também observar o gradiente máximo conforme o tipo de estrada (Quadro 14). (AKAY, 2006; AMARAL et al., 1998; ARIMA et al., 2008; BRASIL 2006, 2012; BURROUGH JUNIOR; KING, 1989; DYKSTRA; HEINRICH, 1996; ESPADA et al., 2013; PINARD et al., 1995; SILVA et al., 2018; SIST, 2000).

Quadro 14. Valores de gradiente e largura adotados para estradas florestais

Tipo de Estrada	Gradiente máximo (%)	Largura da faixa (m)
Primária	< 8	8 – 10
Secundária	< 10	5 – 6
Trilha de arraste	< 100	3,5 – 4,5

Fonte: adaptado de SESSIONS et al. (2007, p. 12).

Duas medidas poderiam ser adotadas para que os métodos evitassem tais áreas. A primeira é a eliminação no grafo dos vértices conflitantes com as áreas impróprias. A segunda opção é a penalização dos vértices que são conflitantes com

tais áreas. Pode-se penalizar, por exemplo, a distância entre os vértices conflitantes, de forma que, sendo a distância maior, o método evitará tal caminho. Neste estudo, adotou-se a penalização dos vértices conflitantes, pois a primeira opção resultaria em soluções inviáveis para vários casos, tendo em vista que há no conjunto de dados áreas com alta densidade de árvores remanescentes. Desta forma, um vértice de origem ou destino nesta região, não poderia ser alcançado.

Ademais, no que diz respeito ao relevo, a observação do gradiente máximo é uma recomendação, de forma que, apesar de não recomendado, não é proibida a construção de estradas em gradientes com inclinação entre 10% e 100%. Da mesma forma, recomenda-se não construir estradas em áreas suscetíveis ao acúmulo de água, mas não há proibição para isso. Assim, a penalização dessas áreas é mais apropriada.

No caso dos obstáculos, como as árvores remanescentes, foi considerado um raio de 15 metros de distância (AMARAL et al., 1998) para que o vértice seja penalizado. Para as áreas de APP foram considerados todos os vértices conflitantes com tais áreas de acordo com a legislação (BRASIL, 2006, 2012). As áreas suscetíveis ao acúmulo de água também tiveram todos os vértices penalizados. E os vértices com inclinação superior a 8% foram penalizados. A penalização foi aplicada com base em um fator multiplicador da distância, que por sua vez, foi informado como parâmetro de entrada do programa. Foram definidos parâmetros distintos para a penalização de todos os fatores avaliados.

### **5.2.3 Etapa 3 do fluxograma: Modelo de otimização e meta-heurísticas**

O problema de menor caminho mais comum é o de uma origem, que possibilita a generalização para variações do problema, como: menor caminho com destino único, menor caminho entre um par de vértices e menor caminho entre todos os pares de vértice. Há variados algoritmos que podem ser aplicados ao problema de menor caminho. Alguns destes são exatos, como a programação linear inteira, o algoritmo Dijkstra e o Bellman-Ford e outros são aproximativos, como as meta-heurísticas *Simulated Annealing*, colônia de formigas e o algoritmo genético (AHN et al., 2002; CORMEN et al., 2012; DIB; MANIER; CAMINADA, 2015; DROZDEK, 2016; EPSTEIN et al., 2006; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; GONZALEZ, 2007; GOODRICH; TAMASSIA, 2013; KANG; JHA; SCHONFELD, 2012; ZIVIANI, 2013).

Neste estudo, utilizou-se métodos exatos e aproximativos aplicados ao problema clássico de caminho mínimo. Os métodos avaliados foram o CPLEX, o algoritmo Dijkstra e as meta-heurísticas *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Simulated Annealing* (SA), que tiveram bons desempenhos em estudos anteriores (AKAY, 2006; AKAY; SESSIONS, 2005; BLUM; ROLI, 2003; DIB; MANIER; CAMINADA, 2015; MARINAKIS; MIGDALAS; SIFALERAS, 2017; TALBI, 2013).

### 5.2.3.1 Programação linear inteira binária (PLIB)

Inicialmente foi executado no CPLEX um modelo PLIB para posterior comparação com o algoritmo Dijkstra e os métodos heurísticos avaliados. Para resolver o problema do traçado de estradas florestais, foi adotado o problema clássico de caminho mínimo, cujo objetivo é à obtenção do caminho mais curto entre dois vértices de um grafo (FÁVERO; BELFIORE, 2013; GOLDBARG; LOUREIRO, 2005), conforme descrito a seguir:

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

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{se } i = o \\ 0 & \text{se } i \neq o \text{ e } i \neq d \\ -1 & \text{se } i = d \end{cases} \quad \forall i, \forall j \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i,j) \in A \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

Em que:  $c_{ij}$  = custo de ligação entre os vértices  $i$  e  $j$ ;  $x_{ij}$  = ligação entre os vértices  $i$  e  $j$ , sendo que, esta variável assumirá o valor 1 se o nó  $x_{ij}$  pertencer ao caminho e 0 no caso contrário;  $o$  e  $d$  representam os vértices de origem e destino do caminho, respectivamente.

A função objetivo (FO) (1) minimiza o somatório dos custos de ligação entre os vértices. A restrição (2) garante que o caminho se inicie a partir do vértice de origem e termine no vértice de destino. Note que, para o primeiro ( $o$ ) e para o último ( $d$ ) vértice, admite-se que não haja um antecessor e sucessor, respectivamente. Além disso, garante que, para cada vértice intermediário selecionado, obrigatoriamente, deve haver 1 antecessor e 1 sucessor igualmente selecionados. E a restrição binária (3) garante que as variáveis de decisão assumam valores 0 ou 1.

### 5.2.3.2 Algoritmo Dijkstra

A versão clássica do algoritmo Dijkstra determina o menor caminho entre o vértice de origem e todos os demais vértices de um grafo (FÁVERO; BELFIORE, 2013; GOLDBARG; LOUREIRO, 2005; ZIVIANI, 2013). Assim, é possível obter o caminho de menor distância entre o vértice de origem e o de destino em uma consulta no conjunto de valores resultante da execução do algoritmo. Para este estudo, foi utilizada a versão do algoritmo que interrompe a busca ao encontrar o vértice de destino (Figura 35).

Figura 35. Pseudocódigo do algoritmo de Dijkstra

1	Dijkstra(G, origem, destino)
2	<b>para</b> todo $v \in V[G]$ <b>faça</b>
3	visitado[v] $\leftarrow$ 0
4	distancia[v] $\leftarrow$ $\infty$
5	antecessor[v] $\leftarrow$ -1
6	<b>fim para</b>
7	distancia[origem] $\leftarrow$ 0
8	atual $\leftarrow$ origem
9	<b>enquanto</b> atual $\neq$ destino <b>faça</b>
10	u = procuraMenorDistancia()
11	visitado[u] $\leftarrow$ 1
12	<b>para</b> todo $i \in G[u]$ <b>faça</b>
13	ind $\leftarrow$ arestas[u][i]
14	<b>se</b> distancia[ind] < 0 <b>então</b>
15	distancia[ind] $\leftarrow$ distancia[u] + pesos[u][i]
16	antecessor[ind] $\leftarrow$ u
17	<b>senão</b>
18	<b>se</b> distancia[ind] > distancia[u] + pesos[u][i] <b>então</b>
19	distancia[ind] $\leftarrow$ distancia[u] + pesos[u][i]
20	antecessor[ind] $\leftarrow$ u
21	<b>fim se</b>
22	<b>fim se</b>
23	<b>fim para</b>
24	atual $\leftarrow$ u
25	<b>fim enquanto</b>
26	<b>retorna</b> distancia, antecessor

Fonte: Adaptado de Ziviani (2013, p. 325).

O algoritmo (Figura 35) requer como parâmetro de entrada o vértice de origem e o de destino (linha 1), que no caso do traçado de estrada, equivale aos pontos de início e término do trecho da estrada. Conforme o pseudocódigo do algoritmo, o primeiro passo é a inicialização dos conjuntos (linhas 2 a 6): “visitado”, para armazenar os nós que já foram visitados; “distancia” que será responsável por

guardar as distâncias entre o vértice de origem e os demais vértices e “antecessor” que armazenará o vértice antecessor de menor distância. A variável “atual” (linha 8) é responsável pelo controle do vértice que está sendo visitado (linhas 9 e 24).

Enquanto houver vértices a serem visitados, a partir do vértice de origem, a função `procuraMenorDistancia()` será requisitada (linha 10) com o objetivo de encontrar o vértice com menor distância do vértice de origem, que ainda não tenha sido visitado. Ao encontrar o vértice de menor distância (vértice  $u$ ), o mesmo é marcado como visitado (linha 11).

Na sequência, o algoritmo Dijkstra realiza uma visita em todos os vizinhos do vértice  $u$  (linhas 12 a 23) e, para cada vértice visitado pela primeira vez, o algoritmo calcula a distância dele para o vértice  $u$  (linha 15) e marca o vértice  $u$  como sendo anterior do vértice visitado (linha 16). Caso o vértice vizinho já tenha sido visitado (linha 17), então verifica se a distância entre ele e  $u$  é menor que a distância atual do vértice visitado (linha 18). Em caso positivo, a distância é atualizada e o vértice antecessor também (linhas 19 e 20). Ao final do procedimento, o algoritmo retorna dois conjuntos de valores contendo as distâncias entre cada par de vértices na rota e os vértices antecessores para que seja possível determinar a rota.

#### 5.2.3.3 Solução inicial

As meta-heurísticas VNS e SA, dependem de uma solução inicial para realizar a busca no espaço de soluções. Neste estudo, para gerar a solução inicial do traçado da estrada foi utilizada uma estratégia construtiva gulosa (HCG). A Figura 36 apresenta o pseudocódigo da heurística HCG responsável por gerar a solução inicial de estradas.

Figura 36. Pseudocódigo da heurística responsável por gerar uma solução inicial de estradas

```

1 HCG(G, origem, destino)
2   para todo  $v \in V[G]$  faça
3     visitado[v]  $\leftarrow$  0
4     distancia[v]  $\leftarrow$   $\infty$ 
5     antecessor[v]  $\leftarrow$  -1
6   fim para
7   distancia[origem]  $\leftarrow$  0
8   atual  $\leftarrow$  origem
9   enquanto atual  $\neq$  destino faça
10    visitado[atual]  $\leftarrow$  1
11    proximo  $\leftarrow$  procuraVizinhoProximo(G, atual, destino)
12    distancia[proximo]  $\leftarrow$  distancia[atual] + distanciaEuclidiana[atual][proximo]
13    antecessor[proximo]  $\leftarrow$  atual
14    atual  $\leftarrow$  proximo
15  fim enquanto
16  FO  $\leftarrow$  distancia[destino]
17  retorna distancia, antecessor, FO

```

Fonte: O autor.

Conforme apresentado (Figura 36), um laço inicial (linhas 2 a 6) é responsável por inicializar os vetores que armazenarão os vértices visitados, a distância entre eles e os antecessores do traçado que está sendo selecionado. A variável “atual” é responsável pelo controle da manutenção da busca pelo vértice final (linhas 8, 9 e 14). A cada iteração do laço a função procuraVizinhoProximo() realiza uma busca nos vizinhos do vértice em avaliação (linha 11), o critério da busca é identificar dentre estes vizinhos, o que está mais próximo do vértice final. Ao encontrar o vértice mais próximo, a função retorna à identificação do vértice, que é então armazenado na variável “proximo”.

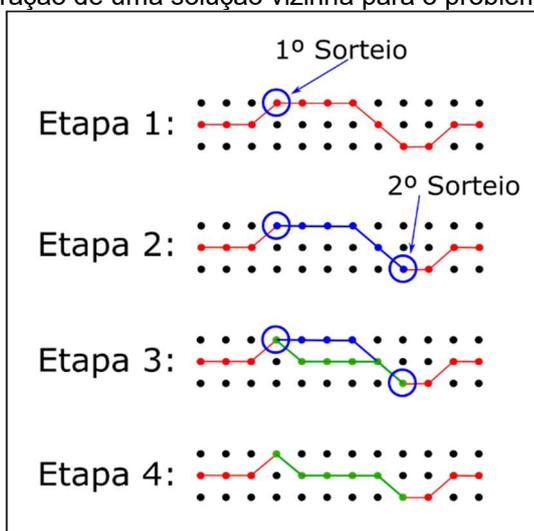
A distância para este vértice é atualizada em relação ao vértice que está sendo avaliado (linha 12). Da mesma forma, o vértice antecessor também é atualizado (linha 13). Assim, estabeleceu-se um trecho do traçado, pois definiu-se que o vértice atual é antecessor do próximo vértice e a distância entre eles. Na sequência o vértice atual é atualizado para o próximo (linha 14), isso permitirá que o laço possa dar sequência à busca do próximo trecho. Ao concluir a busca, o valor da função objetivo da solução inicial é atualizado (linha 16) e os valores da solução inicial são retornados (linha 17).

#### 5.2.3.4 Solução vizinha

Um número considerado de meta-heurísticas adota a estratégia de avaliar os vizinhos de uma solução na busca da maximização do resultado do problema. Como os problemas possuem estruturas diferentes, então cada um requer uma estratégia de vizinhança específica. Assim, foi construída uma heurística para a obtenção de

uma solução vizinha, específica para o problema de traçado de estradas florestais. O conceito de solução vizinha adotado refere-se à troca de parte dos vértices presentes na solução atual. Para realizar a troca utiliza-se uma estratégia gulosa. Um exemplo é apresentado a seguir (Figura 37).

Figura 37. Etapas da geração de uma solução vizinha para o problema do traçado de estradas



Fonte: O autor.

Na primeira etapa da geração da solução vizinha, a heurística de vizinhança realiza o sorteio de um vértice presente na solução atual. Esse é considerado o vértice de início do trecho que será trocado por vértices vizinhos. Após isso, na segunda etapa, um novo número é sorteado para definir o último vértice do trecho que será substituído. O segundo sorteio limita a distância do último vértice para que trechos muito compridos não sejam gerados. No exemplo (Figura 37), o número sorteado é cinco.

Na etapa 3 (Figura 37), uma busca gulosa, similar à implementada na heurística HCG, é aplicada para obter o caminho mais curto entre os dois vértices sorteados. Mas, diferente da HCG, a estratégia gulosa assume um papel de semigulosa por meio de um sorteio com probabilidade de ocorrer em 10% das vezes. Para isso, a heurística sorteia a decisão de obter o primeiro ou o segundo vértice mais próximo, para então decidir qual será o próximo vértice associado.

Essa estratégia possibilitou à heurística de vizinhança escapar de ótimos locais e com isso, o valor ótimo da função objetivo, que antes não era alcançado, passou a ser. A quarta e última etapa envolve atualizar a solução atual com o novo conjunto de vértices obtidos, sendo essa é a solução vizinha.

### 5.2.3.5 Busca local

A meta-heurística VNS adota a estratégia de aplicar uma busca local na solução para intensificar a busca. Neste estudo foram implementadas duas heurísticas de busca local, denominadas como *First improvement* e *Best improvement*.

No procedimento de busca, a heurística recebe uma solução, que é considerada como ponto de partida para a análise do espaço de soluções. Os vértices da solução inicial são visitados e, para cada vértice do traçado da estrada visitado, faz-se a troca pelos seus vizinhos, se a conexão com os vértices antecessor e sucessor não se perder. Para cada troca o algoritmo calcula a nova função objetivo. Após o cálculo, verifica se a solução examinada é melhor que a solução inicial. Caso seja, armazena a troca do vértice. No caso do *First improvement* a busca é interrompida (GONZALEZ, 2007).

### 5.2.3.6 Variable neighborhood search (VNS)

A VNS (MLADENOVIĆ; HANSEN, 1997) (Figura 38) requer dois parâmetros de entrada (linha 1),  $VNS_{max}$  que permite determinar o número máximo de iterações e  $Viz$  que define o número de estruturas diferentes de vizinhança. Além disso, o VNS requer uma solução inicial,  $S_0$ , para realizar a busca pela vizinhança. Nesse caso, foi utilizada a Heurística HCG implementada para este estudo. Para a busca local, foram avaliados dois métodos, *First improvement* e *Best improvement*, de forma que, esta informação também é um parâmetro de entrada para o VNS.

Figura 38. Pseudocódigo da VNS aplicado à determinação do traçado de estradas florestais

```

1  VNS ( $S_0$ ,  $VNS_{max}$ ,  $Viz$ )
2   $mS \leftarrow S_0$ 
3  enquanto  $i \leq VNS_{max}$  faça
4     $i \leftarrow i + 1$ 
5     $k \leftarrow 1$ 
6    enquanto  $k \leq Viz$  faça
7      obter(vizinho  $nS \in N^k(mS)$ )
8       $aS \leftarrow buscaLocal(nS)$ 
9      se  $f(aS) < f(mS)$  então
10        $mS \leftarrow aS$ 
11        $k \leftarrow 1$ 
12     senão
13        $k \leftarrow k + 1$ 
14     fim se
15   fim enquanto
16 fim enquanto
17 retorna  $mS$ 

```

Fonte: Adaptado de Silva e Urrutia (2010, p. 204).

A variável  $k$  garante a intensificação em regiões promissoras e o abandono das não promissoras (linhas 5, 6, 11, 13). A cada iteração, um vizinho é gerado com base na melhor solução até o momento (linha 7), para isso foi utilizada a heurística HCG. Na sequência o VNS aplica uma busca local à solução vizinha (linha 8), com o intuito de intensificar a busca. A seguir ocorre a comparação entre a solução vizinha e a melhor solução (linha 9), até o momento. Se, ao comparar a FO da solução atual à FO da melhor solução, o retorno for verdadeiro, a melhor solução é atualizada (linha 10). O VNS conclui retornando a melhor solução (linha 17).

### 5.2.3.7 Simulated Annealing (SA)

Neste estudo, foi utilizada a versão clássica do SA (Figura 39), que mantém as iterações ativas por meio das temperaturas: inicial e de congelamento (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983).

Figura 39. Pseudocódigo do SA

1	$SA(S_0, T_0, T_c, SA_{max}, \alpha)$
2	$mS \leftarrow S_0$
3	$IterT \leftarrow 0$
4	$T \leftarrow T_0$
5	<b>enquanto</b> $T > T_c$ <b>faça</b>
6	<b>enquanto</b> $IterT < SA_{max}$ <b>faça</b>
7	$IterT \leftarrow IterT + 1$
8	obter(vizinho $aS \in N(S_0)$ )
9	$\Delta \leftarrow f(aS) - f(S_0)$
10	<b>se</b> $\Delta < 0$ <b>então</b>
11	$S_0 \leftarrow aS$
12	<b>se</b> $f(aS) < f(mS)$ <b>então</b>
13	$mS \leftarrow aS$
14	<b>fim se</b>
15	<b>senão</b>
16	random( $x \in [0,1]$ )
17	<b>se</b> $x < e^{-\Delta/T}$ <b>então</b>
18	$S_0 \leftarrow aS$
19	<b>fim se</b>
20	<b>fim se</b>
21	<b>fim enquanto</b>
22	$T \leftarrow \alpha \times T$
23	$IterT \leftarrow 0$
24	<b>fim enquanto</b>
25	<b>retorna</b> $mS$

Fonte: Adaptado de Goldberg, Goldberg e Luna (2016, p. 110).

O SA possui dois laços, o primeiro (linha 5) é responsável por manter as iterações ativas enquanto a temperatura não atinge o congelamento, por meio da

taxa de resfriamento (linha 22). O segundo laço (linha 6), é responsável pelas iterações que farão a busca pelo estado em que será atingido o equilíbrio térmico do fenômeno natural representado pelo SA. Para atingir o equilíbrio térmico, primeiro gera-se um vizinho  $S'$  (linha 8). O passo seguinte é o cálculo da variação (linha 9). Se o valor da FO da solução vizinha for maior, então a variação  $\Delta$  será positiva, se for menor, o contrário.

Se a variação é negativa, então melhorou, para um problema de minimização, a solução  $aS$ , é aceita (linha 11), na sequência, verifica-se se ela também é melhor que a solução global (linhas 12-14), se for, então ela é atualizada. Mas, se a variação for positiva, a solução piorou, mas ainda é possível de ser aceita, caso a condição (linha 17) seja verdadeira. Então a solução corrente será trocada pela solução vizinha (linha 18), mesmo ela sendo pior. Isso permitirá que o SA consiga escapar de ótimos locais.

#### **5.2.4 Etapa 4 do fluxograma: Calibração dos parâmetros**

As três instâncias construídas a partir da base de dados, foram inicialmente solucionadas no *software* ILOG CPLEX Optimization Studio 12.7.1® e pelo algoritmo Dijkstra (Figura 35). Posteriormente, as instâncias foram solucionadas por meio das meta-heurísticas propostas. Para cada instância foram obtidas 30 soluções (repetições). O computador utilizado possui processador I7-7500U CPU 2,70GHz e 16GB de memória RAM.

Na definição dos parâmetros analisados, foram consideradas informações técnicas como os pontos de início e término dos trechos de estradas (Tabela 9), localização de nascentes, árvores remanescentes e APPs. Foram consideradas também informações de relevo, áreas suscetíveis ao acúmulo de água e inclinação medida em termos percentuais.

As áreas que devem ser evitadas foram penalizadas com um fator multiplicador da distância para essas regiões (Tabela 10). O fator multiplicador foi definido com base na análise dos resultados de testes aplicados na UT-3, variando os fatores entre 1 e 4. Assim, espera-se que os métodos sejam capazes de realizar os desvios necessários.

Tabela 10. Parâmetros de penalização para o problema de traçado de estradas florestais

Parâmetro	Valor
Penalização de obstáculos (árvores remanescentes e nascentes)	2
Penalização das áreas de APP	4
Penalização de áreas suscetíveis ao alagamento	4
Penalização de áreas com inclinação acima de 8%	2
Raio de distância de obstáculos	15 m

Fonte: O autor.

Para a definição dos parâmetros de entradas das meta-heurísticas foi adotada a metodologia apresentada em Mauri et al. (2016). Para calibrar foi utilizada a instância 1 – UT-3, em que, para cada meta-heurística foram definidas faixas de valores para os parâmetros. As heurísticas foram executadas por cinco vezes para cada possível combinação desses parâmetros e a que produziu o melhor resultado médio combinado com o melhor tempo médio para a obtenção da melhor solução foi adotada.

Para este problema, o VNS requer a configuração de três parâmetros: o número de estruturas de vizinhança, o número máximo de iterações e o método de busca local (Tabela 11). Como já mencionado, neste estudo foram adotados dois métodos diferentes de busca local (*First improvement* e *Best improvement*). Desta forma, o método também foi calibrado. Para a solução inicial foi utilizada a heurística HCG implementada para o problema de traçado de estradas florestais. Esta heurística executa uma vez apenas e retorna uma solução viável.

Tabela 11. Parâmetros de entrada para o VNS para o problema de traçado de estradas florestais

Parâmetro	Faixa de valores	Valor adotado
N.º de estruturas de vizinhança diferentes	[5; 10; 15]	10
N.º máximo de iterações	[10; 20; 30]	30
Método de busca local	[ <i>First improvement</i> ; <i>Best improvement</i> ]	<i>Best improvement</i>
Método de solução inicial	-	HCG

Fonte: O autor.

Para o SA foram calibrados os parâmetros Temperatura inicial; iterações de vizinhança e taxa de resfriamento. A solução inicial foi gerada nos mesmos moldes do VNS (Tabela 12).

Tabela 12. Parâmetros de entrada do SA para o problema de traçado de estradas florestais

Parâmetro	Faixa de valores	Valor adotado
Temperatura inicial	[1; 5; 10]	10
Temperatura de congelamento	-	0,1
Taxa de resfriamento	[0,90; 0,95; 0,99]	0,90
Iterações de vizinhança	[20; 30; 40]	40
Método de solução inicial	-	HCG

Fonte: O autor.

### 5.2.5 Etapa 5 do fluxograma: Análise e resultados

Inicialmente foi realizada uma análise da influência das variáveis, declividade, áreas suscetíveis ao acúmulo de água, árvores remanescentes, nascentes e APP, no traçado da estrada. Para isso, foi executado o algoritmo Dijkstra duas vezes na UT-3 para cada variável e na UT-5 para avaliar a variável APP. Na primeira vez, foi adotado o valor 1 (um) como fator de penalização, ou seja, sem penalização. E na segunda execução, aplicou-se o fator de penalização conforme definido no estudo (Tabela 10). O resultado foi então produzido para análise com o auxílio de um SIG.

Na sequência foram analisados os resultados computacionais. Para isso, considerou-se para cada instância e para cada técnica de solução o comprimento do traçado [Extensão (m)], a melhor solução encontrada [Melhor Sol (m)], a média dentre as FO encontradas [Média Sol (m)], o desvio das soluções [Desvio (%)], o tempo de processamento computacional para encontrar a melhor solução [Tempo (segundos)], o tempo médio para obter a melhor solução [Tempo médio (segundos)] e o GAP (%). As médias foram calculadas apenas para as técnicas heurísticas com base em 30 execuções. O desvio das soluções foi calculado com a Equação 11 conforme a metodologia de Mauri et al. (2016).

(11)

$$Dev(\%) = \frac{\bar{x} - x_{melh}}{x_{melhor}} \times 100$$

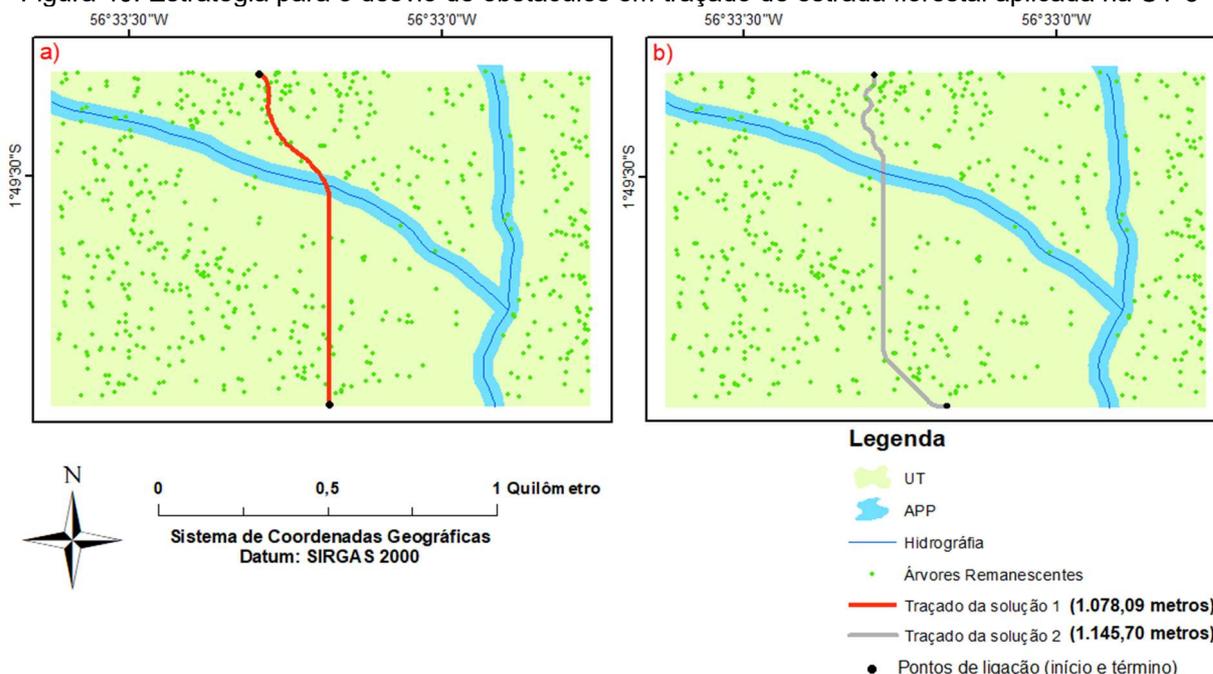
Em que: Dev(%) = percentagem do desvio da melhor solução obtida em função da média das 30 execuções;  $\bar{x}$  = média das soluções encontradas (m);  $x_{melhor}$  = melhor solução encontrada (m).

## 5.3 RESULTADOS

### 5.3.1 Análise das variáveis declividade, áreas suscetíveis ao acúmulo de água, árvores remanescentes, nascentes e APP

A primeira avaliação considerou apenas a necessidade de desviar dos obstáculos. Na primeira execução do algoritmo Dijkstra foi adotado o valor 1 (um) como fator de penalização, ou seja, sem penalização (Figura 40a), o objetivo foi comparar com o resultado considerando a penalização para então analisar a influência dos obstáculos no traçado. E na segunda execução (Figura 40b), aplicou-se o fator de penalização parametrizado para o estudo.

Figura 40. Estratégia para o desvio de obstáculos em traçado de estrada florestal aplicada na UT-3

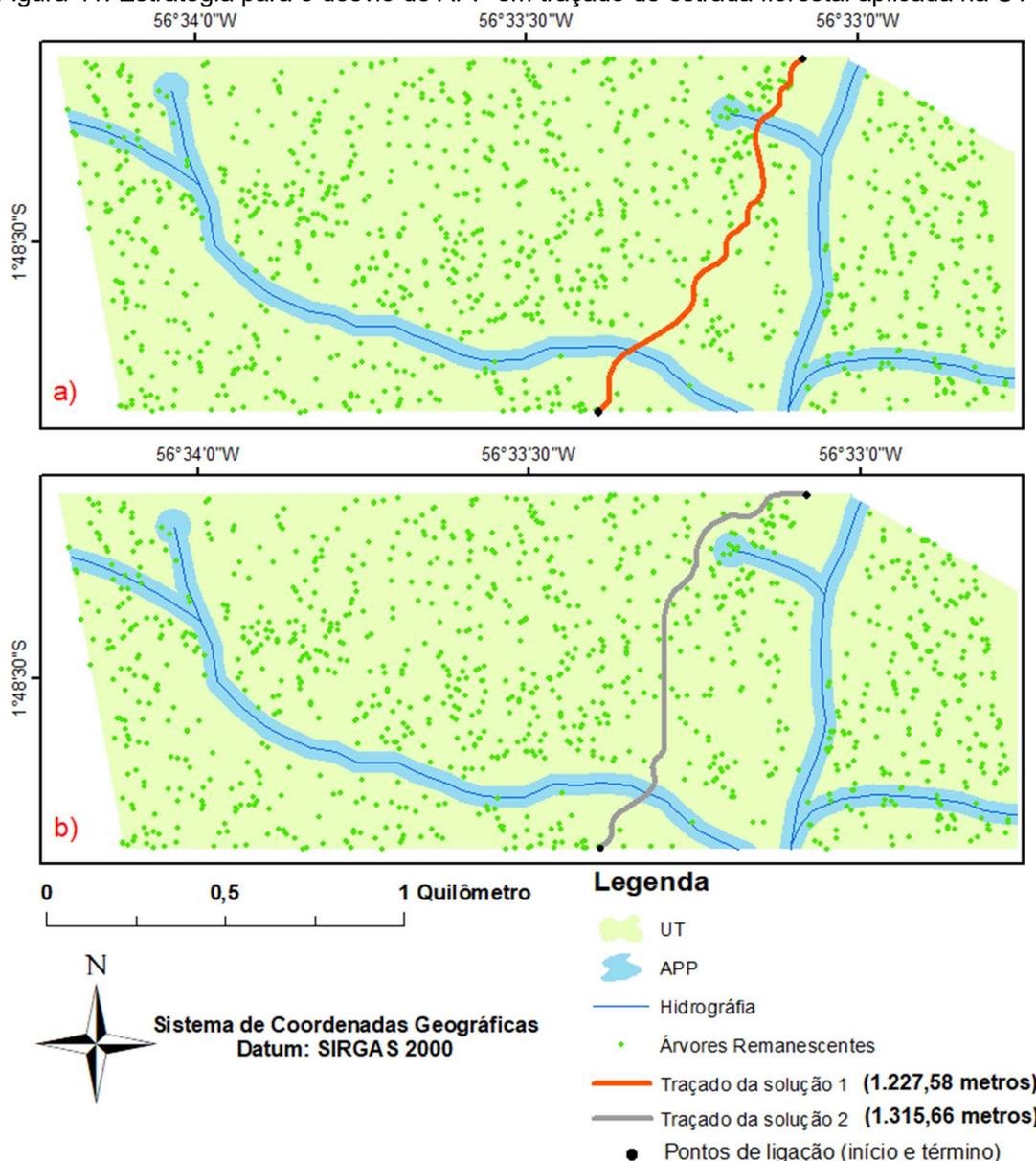


Fonte: O autor.

É natural que ao penalizar tais vértices, a extensão da estrada se torne maior, conforme observado (Figura 40). Assim, na Figura 40a o trecho de estrada totaliza 1.078,09 metros, enquanto na Figura 40b o trecho, cujos vértices de início e término são idênticos, totaliza 1.145,70 metros em função da penalização aplicada com fator igual a 2 (dois). Ou seja, houve um aumento de 67,61 metros ( $\cong 6,27\%$ ).

Em um segundo momento, avaliou-se a penalização considerando também as áreas de APP. Da mesma forma, aplicou-se o algoritmo Dijkstra por duas vezes na UT-5. Novamente, a primeira execução não considerou a penalização das APPs e na segunda execução a penalização foi considerada, conforme parâmetros adotados (Tabela 10), para possibilitar a comparação. Pode-se verificar (Figura 41) que na UT-5 há áreas de APP em que é possível realizar o desvio, bem como também há áreas em que não é possível. Na Figura 41a o fator de penalização é 1 (um). Assim, dois trechos de APP foram cruzados pelo traçado da estrada, pois ao multiplicar a distância por 1, não houve penalização.

Figura 41. Estratégia para o desvio de APP em traçado de estrada florestal aplicada na UT-5

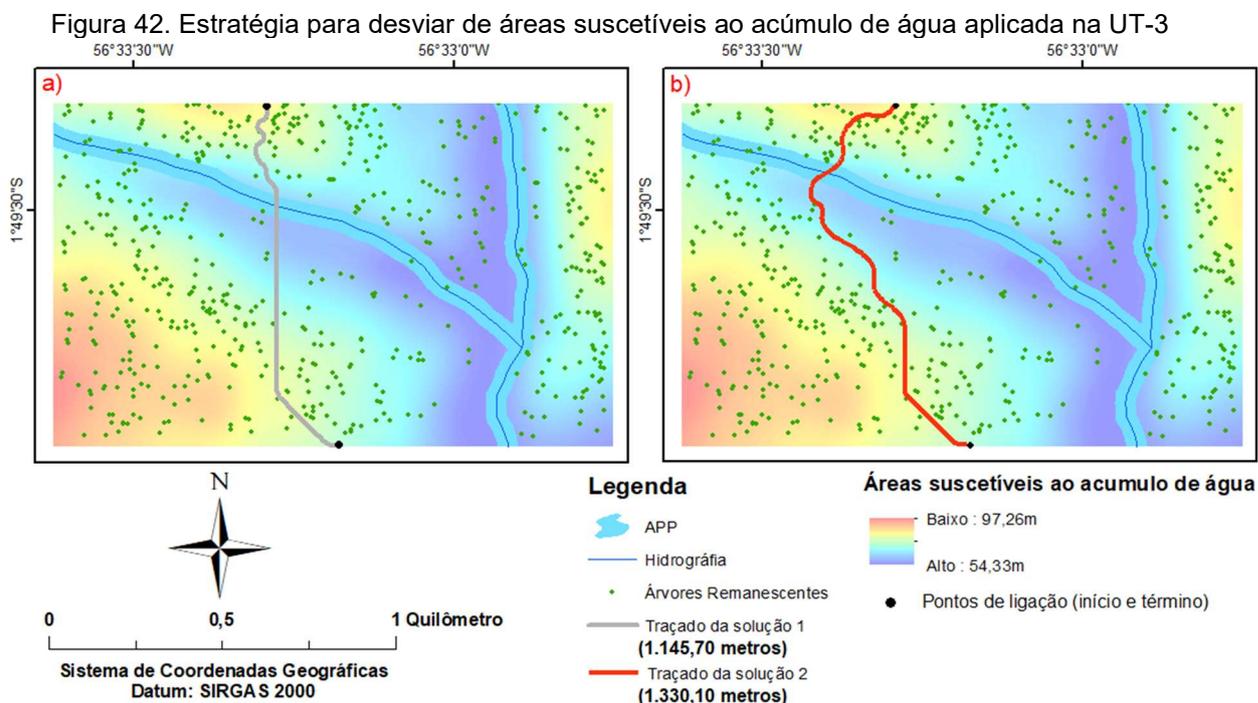


Fonte: O autor.

Na Figura 41b, o fator de penalização é 4 (quatro), assim, pode-se observar que a penalização tornou a distância pela APP extensa o suficiente para que o algoritmo encontre um menor caminho, cujo traçado desviou de uma das APPs. Com o desvio da APP, a extensão da estrada, naturalmente ficou maior (88,08 m). Contudo, o traçado atende às boas práticas de exploração de impacto reduzido.

Avaliou-se também a capacidade da solução em determinar um traçado que evite as áreas com inclinação que ultrapasse os limites recomendados e o desvio de áreas suscetíveis ao acúmulo de água. Na primeira análise penalizou-se apenas as áreas suscetíveis ao acúmulo de água, conforme a Tabela 10. Ao aplicar a penalização igual a 4 (quatro), é perceptível que o traçado foi determinado evitando

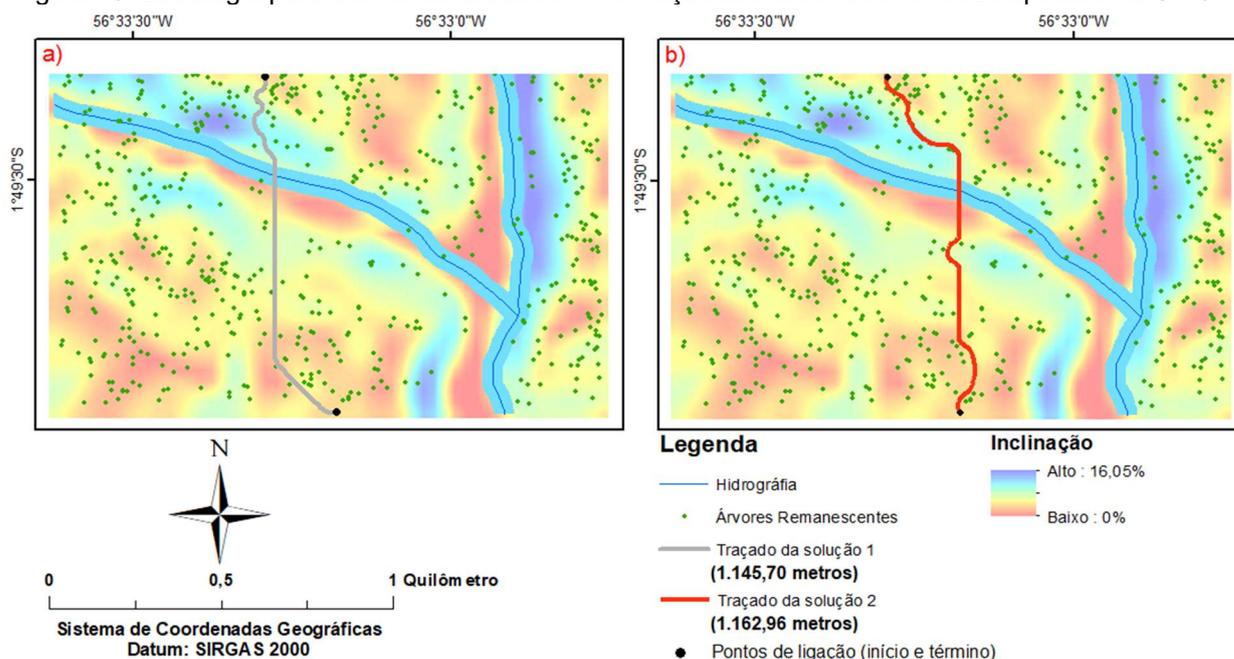
as áreas com uma alta suscetibilidade (Figura 42b). Efeito este não observado no caso em que a penalização é igual a 1 (um) (Figura 42a). A diferença provocada pelos desvios resultou em um total de 184,40 m adicionais ao traçado.



Fonte: O autor.

Na sequência avaliou-se a penalização das áreas com inclinação superior a 8%. Observa-se (Figura 43a) que o traçado sem considerar a penalização não passa pelas áreas com a ocorrência das maiores inclinações. Contudo, passa por áreas de inclinação mediana, apesar da existência de áreas adjacentes com inclinação baixa. Assim, ao aplicar a penalização, o traçado obtido (Figura 43b) favoreceu as áreas com inclinação mais baixa resultando em um traçado com 17,26 m adicionais, em relação ao traçado utilizado na comparação. Pode-se afirmar então, que em ambos os casos, a estratégia de penalizar as áreas de difícil escoamento e de inclinação acima do recomendado, foi eficaz, conforme observado nos exemplos apresentados.

Figura 43. Estratégia para desviar de áreas com inclinação acima do recomendado aplicada na UT-3



Fonte: O autor.

### 5.3.2 Resultados computacionais para o traçado de estradas

Os resultados computacionais foram resumidos na Tabela 13. É possível observar que dentre os três métodos de solução, os dois métodos exatos, PLIB e Dijkstra, foram capazes de obter a solução ótima em todas as instâncias. O Dijkstra foi o mais eficiente, obtendo a solução ótima em tempo inferior a todos os demais métodos, para as três instâncias. As meta-heurísticas, embora tenham obtido bons resultados, foram capazes de obter um GAP próximo de zero apenas na primeira instância. Além disso, o tempo de execução necessário foi superior aos métodos exatos, chegando a passar de 1 (um) minuto para a instância 3 nos experimentos com a meta-heurística VNS.

Tabela 13. Resultados computacionais para o traçado de estradas

Instância	Método	Extensão (m)	Melhor Sol (m)	Média Sol (m)	Desvio (%)	Tempo (segundos)	Tempo médio (segundos)	GAP (%)
1	PLIB	1.531,81	1.779,98	-	-	0,590	-	0,00
	Dijkstra	1.531,81	1.779,98	-	-	0,001	-	0,00
	SA	1.432,46	1.797,60	1.841,25	2,43	3,270	6,195	0,98
	VNS	1.457,37	1.807,97	1.881,48	4,07	28,280	39,400	1,55
2	PLIB	2.462,65	2.793,34	-	-	1,810	-	0,00
	Dijkstra	2.462,65	2.793,34	-	-	0,031	-	0,00
	SA	2.596,87	2.898,15	2.921,58	0,81	6,020	11,647	3,62
	VNS	2.596,82	2.917,59	2.923,07	0,19	48,590	49,441	4,26
3	PLIB	2.939,93	3.500,85	-	-	3,230	-	0,00
	Dijkstra	2.939,93	3.500,85	-	-	0,063	-	0,00
	SA	2.869,84	3.771,33	3.947,38	4,67	55,440	43,836	7,17
	VNS	2.876,93	3.790,92	3.988,59	5,21	75,520	103,251	7,65

Nota: - indica 'não reportado';

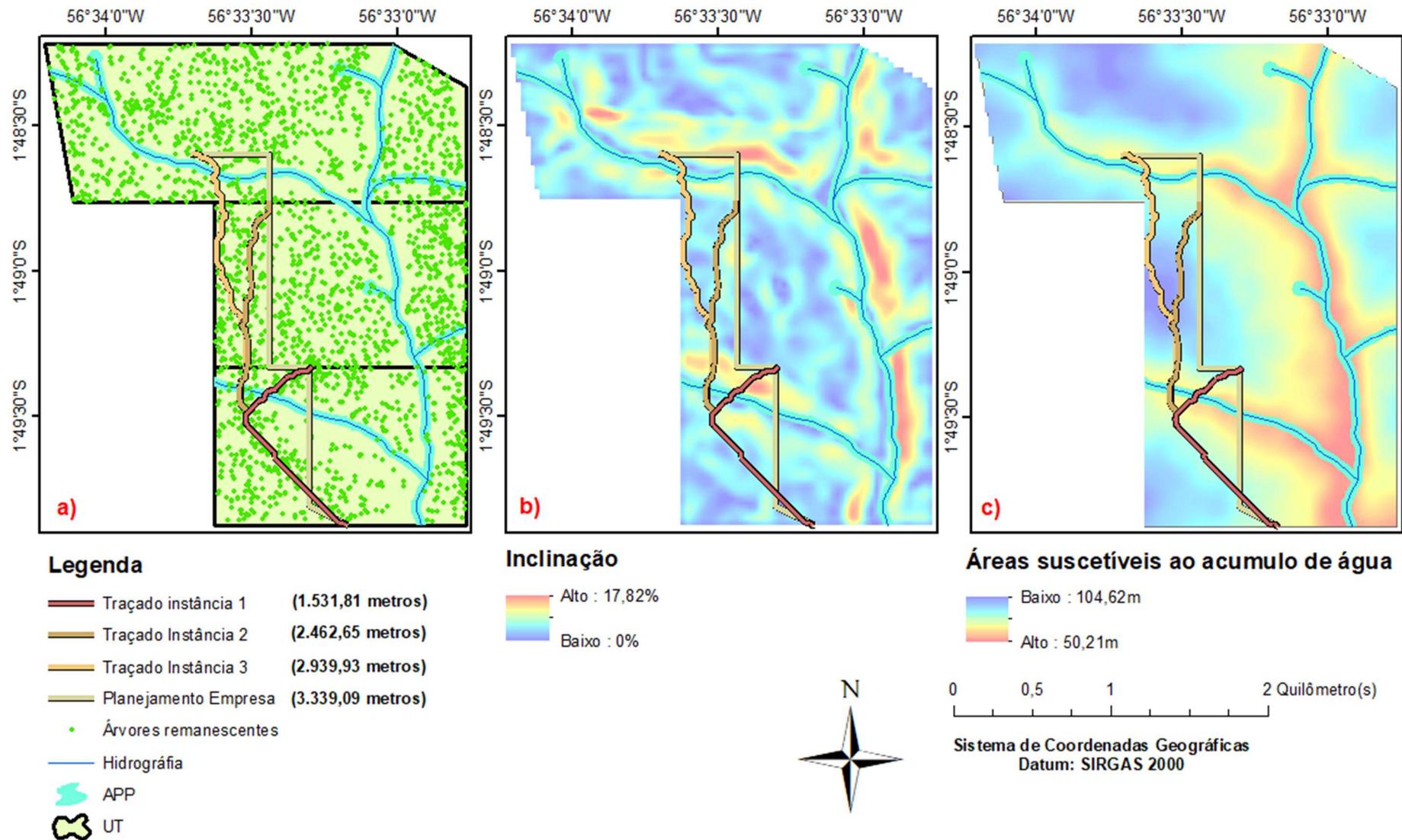
Fonte: O autor.

Outro resultado observado para as meta-heurísticas é o desvio que foi baixo para a instância 2 e alto nos demais casos, o que indica uma baixa estabilidade do método. Na primeira instância, o desvio alto obtido pela SA e o VNS pode ter ocorrido porque em ambos os casos, as meta-heurísticas foram capazes de obter soluções próximas da ótima, assim, as execuções que não atingiram o resultado ótimo afetaram a média e consequentemente o desvio.

Em relação à extensão do traçado e a melhor FO obtida pelos métodos (Tabela 13), observa-se que nem mesmo os métodos exatos escolheram um menor caminho em que todas as restrições foram evitadas. Isso pode ser observado pela diferença no valor da extensão em relação ao valor da FO que é afetado pela penalização. Isso pode indicar que a aplicação de penalização em todas as variáveis avaliadas, desvio de árvores remanescentes, nascentes, APP, áreas suscetíveis ao acúmulo de água e áreas com inclinação superior ao indicado, tornou o problema muito restritivo.

O traçado obtido pelo algoritmo Dijkstra para as três instâncias juntamente com o planejamento realizado pela empresa pode ser visualizado na Figura 44. Note que todos os traçados possuem um mesmo ponto de origem e os pontos de término de cada instância coincidem com o ponto de término do traçado planejado pela empresa. Observe também que o planejamento realizado pela empresa é sistemático, e com isso, não foram evitados os obstáculos (Figura 44a), as áreas com inclinação acima do recomendado para estrada primária (Figura 44b) e por fim, também não foram evitadas as áreas suscetíveis ao acúmulo de água (Figura 44c).

Figura 44. Comparação do traçado obtido pelo Dijkstra com o planejamento da Empresa para as três instâncias



Fonte: O autor.

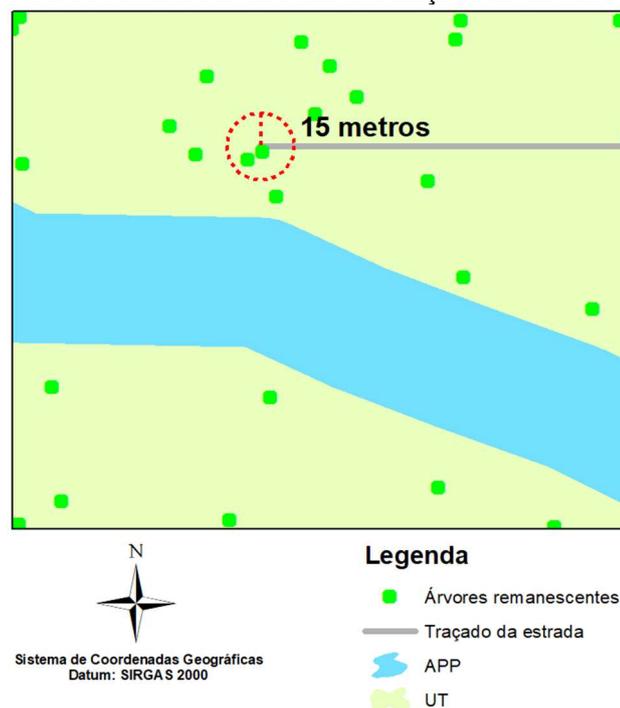
Por outro lado, o algoritmo Dijkstra obteve uma solução que favorece um menor dano ambiental e evita áreas que podem ser alagadiças e com inclinação acima do indicado, como pode-se observar (Figura 44). E apesar do objetivo de evitar tais áreas, o que conseqüentemente promove mais curvas, observa-se que a extensão do traçado obtido pelo algoritmo é menor que a extensão da estrada planejada pela empresa. Por fim, todos os métodos foram eficazes em obter soluções considerando as variáveis avaliadas, além disso, pode-se afirmar que todos foram eficientes em obter respostas em tempo viável para a aplicação em um planejamento real.

#### 5.4 DISCUSSÃO

Em todas as instâncias, os métodos obtiveram soluções que violaram parcialmente as restrições impostas, por meio da penalização das áreas inviáveis, mas cabe salientar que a variável de decisão na escolha da solução pelo método é a FO, que é a extensão do traçado afetada pela penalização. Além disso, é importante destacar que em todas as instâncias, os pontos de início e término definidos requerem a travessia de APP, área esta que é toda penalizada, o que implica, nestes casos, na impossibilidade de que a FO seja idêntica à extensão.

Além disso, há ocorrência nas instâncias de áreas com alta densidade de árvores remanescentes nas imediações de pontos de início ou término do traçado, como pode ser observado no exemplo (Figura 45). Assim, para que o método encontre uma rota que atenda ao ponto de início ou término, ele necessariamente precisará escolher um caminho que é afetado pela penalização.

Figura 45. Presença de árvores remanescentes nas imediações do término do traçado da Instância 3



Fonte: O autor.

Isso mostra a importância de tratar tais restrições com penalização, pois uma alternativa seria remover os vértices de tais áreas. Contudo, isso iria resultar em solução impossível de ser obtida. Com o uso da penalização, os resultados do planejamento podem indicar ao engenheiro florestal a necessidade de alterar ponto(s) de início ou término, antes considerados, ou mesmo incluir no plano a necessidade de abate de indivíduos antes definidos como remanescentes, para viabilizar o acesso à área.

Cabe salientar que ao buscar uma densidade ótima, não há garantia de um layout de estradas otimizado e do traçado obtido pelos métodos apresentar muitas curvas, um planejamento proposto por um método automatizado pode sofrer ajustes e refinamentos em campo, conforme a necessidade. Por fim, os resultados (Tabela 13) indicam que para o conjunto de dados utilizado e variáveis consideradas, o método mais eficaz e eficiente foi o algoritmo Dijkstra, obtendo a solução ótima em todos os casos e em menor tempo.

## 5.5 CONCLUSÃO

Dentre os métodos exatos, o mais eficiente foi o Dijkstra e, com isso, este é o método recomendado para a aplicação no problema do traçado de estradas florestais. Em geral, as meta-heurísticas foram eficientes em obter soluções viáveis

em tempo factível. Contudo, não foram capazes de superar a eficiência e eficácia dos métodos exatos CPLEX e Dijkstra para este problema.

Os métodos se mostraram eficientes em prover um traçado para o planejamento de estradas florestais em área de MFS considerando as variáveis declividade, árvores remanescentes, nascentes, APPs, inclinação do terreno e áreas suscetíveis ao acúmulo de água. Haja vista o tempo necessário para o processamento e a eficácia obtida, pode-se afirmar que é viável o uso de métodos computacionais como auxílio ao gestor florestal no planejamento do traçado de estradas florestais.

Por fim, a determinação do traçado de estradas florestais levando em conta os aspectos ambientais da área, como: declividade, árvores remanescentes, nascentes, APPs, inclinação do terreno e áreas suscetíveis ao acúmulo de água, é de suma importância para prover ao gestor um planejamento realista e obter uma redução da densidade de estradas pelo uso de técnicas computacionais que superam a habilidade humana na análise de um conjunto de variáveis. Cabe lembrar que, ao reduzir a densidade de estradas, conseqüentemente obtém-se a redução de danos ao solo, da abertura do dossel da floresta e da fragmentação florestal.

## 5.6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AHN, C. W.; MEMBER, S.; RAMAKRISHNA, R. S.; MEMBER, S. A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 6, 2002.

AKAY, A. E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. **Sadhana**, Bangalore, Karnataka, India, v. 31, n. 5, p. 621–633, out. 2006. ISSN 0973-7677. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02715918>>.

AKAY, A. E.; SESSIONS, J. Applying the decision support system, tracer, to forest road design. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 20, n. 3, p. 184–191, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/wjaf/20.3.184>>.

AMARAL, P.; VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; VIDAL, E. **Floresta para sempre: um manual para a produção de madeira na Amazônia**. Belém, PA: Imazon, 1998. 130 p.

ARIMA, E. Y.; WALKER, R. T.; SALES, M.; JR., C. S.; PERZ, S. G. The fragmentation of space in the amazon basin: Emergent road networks. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 6, p. 699–709, 2008. ISSN 0099-1112. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14358/PERS.74.6.699>>.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys**, ACM, New York, NY, USA, v. 35, n. 3, p. 268–308, set. 2003. ISSN 0360-0300. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/937503.937505>>.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**, Brasília, DF, maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa nº 5, de 11 de dez. de 2006. **Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFSs nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências**, Brasília, DF, dez. 2006.

BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; ARAÚJO, H. J. B. de; MIRANDA, E. M. de. **Plano de exploração sob critérios de manejo florestal de baixo impacto**. Rio Branco, AC: Embrapa-CPAF/AC, 1998. 20 p. Circular Técnica, 27.

\_\_\_\_\_. Manejo da floresta nativa e sua viabilidade. In: SEMINÁRIO EM TECNOLOGIA DA MADEIRA E PRODUTOS FLORESTAIS NÃO-MADEIRÁVEIS, 2., 2002, Curitiba, Paraná. **Congresso Ibero-Americano de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Florestais**. Curitiba, Paraná, 2002. P. 1–11.

\_\_\_\_\_. **Planejamento da Exploração em Florestas Naturais**. 1. Ed. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2005. 32 p. ISBN 1517-526X.

BURROUGH JUNIOR, E. R.; KING, J. G. **Reduction of soil erosion on forest road**. 1. Ed. Utah: Intermountain Research Station, 1989. 21 p.

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**, v. 37, n. 2, p. 276–292, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/x06-219>>.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R.; STEIN, C. **Algoritmos: teoria e prática**. 3. Ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2012. ISBN 978-85-352-3699-6.

DIB, O.; MANIER, M.-A.; CAMINADA, A. Memetic algorithm for computing shortest paths in multimodal transportation networks. **Transportation Research Procedia**, v. 10, p. 745–755, 2015. ISSN 2352-1465. 18<sup>th</sup> Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 14-16 July 2015, Delft, The Netherlands.

DROZDEK, A. **Estruturas de dados e algoritmos em C++**. 4. Ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2016. 706 p. ISBN 978-85-221-2573-9.

DYKSTRA, D. P.; HEINRICH, R. **FAO model code of forest harvesting practice**. 1. Ed. Rome: FAO, 1996. ISBN 92-5-103690-X.

EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A.; SAPUNAR, P.; NIETO, E.; SESSIONS, J. B.; SESSIONS, J.; BUSTAMANTE, F.; MUSANTE, H. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. **Operations Research**, v. 54, n. 6, p. 1017–1027, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/opre.1060.0331>>.

ESPADA, A. L. V.; PIRES, I. P.; LENTINI, M. A. W.; BITTENCOURT, P. R. G. **Manejo Florestal e Exploração de Impacto Reduzido em Florestas Naturais de Produção da Amazônia**: Informativo técnico 1. Altamira, PA: Instituto Florestal Tropical, 2013. 31 p.

EZZATI, S.; NAJAFI, A.; YAGHINI, M.; HASHEMI, A. A.; BETTINGER, P. An optimization model to solve skidding problem in steep slope terrain. **Journal of Forest Economics**, v. 21, n. 4, p. 250–268, 2015. ISSN 1104-6899. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfe.2015.10.001>>.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. 1. Ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2013. 541 p. ISBN 978-85-352-4843-7.

FFT – FUNDAÇÃO FLORESTA TROPICAL. **Manual de procedimentos técnicos para condução de manejo florestal e exploração de impacto reduzido**. Belém, PA: Fundação Florestal Tropical, 2002. 89 p.

FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. 1. Ed. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007. 183 p. ISBN 978-85-99190-04-3.

MACHADO, C. C. **Estradas rurais e florestais**. 1. Ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 441 p. ISBN 978-85-8179-037-4.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. 1. Ed. New York, NY, USA: Kluwer Academic Publishers, 2003. 570 p. ISBN 0-306-48056-5.

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e meta-heurísticas**: algoritmos e aplicações. 1. Ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2016. 416 p. ISBN 978-85-352-7812-5.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. 2. Ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2005. 518 p. ISBN 978-85-352-1520-5.

GONZALEZ, T. F. **Handbook of approximation algorithms and metaheuristics**. 1. Ed. Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall, 2007. 1427 p. ISBN 978-1-58488-550-4.

GOODRICH, M. T.; TAMASSIA, R. **Estruturas de dados e algoritmos em Java**. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 713 p. ISBN 978-85-8260-018-4.

KANG, M.-W.; JHA, M. K.; SCHONFELD, P. Applicability of highway alignment optimization models. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Oxford, v. 21, n. 1, p. 257–286, set. 2012. ISSN 0968-090X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.09.006>>.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, Washington, DC, USA, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. ISSN 0036-8075. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1690046>>.

MARCATTI, G. E. **Otimização do traçado geométrico de estradas florestais**. 47 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.

MARINAKIS, Y.; MIGDALAS, A.; SIFALERAS, A. A hybrid particle swarm optimization – variable neighborhood search algorithm for constrained shortest path problems. **European Journal of Operational Research**, v. 261, n. 3, p. 819–834, 2017. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.031>>.

MAURI, G. R.; RIBEIRO, G. M.; LORENA, L. A. N.; LAPORTE, G. An adaptive large neighborhood search for the discrete and continuous berth allocation problem. **Computers & Operations Research**, v. 70, p. 140–154, 2016. ISSN 0305-0548. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.002>>.

MLADENOVIĆ, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. **Computers & Operations Research**, Oxford, England, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, abr. 1997. ISSN 0305-0548.

PICARD, N.; GAZULL, L.; FREYCON, V. Finding optimal routes for harvesting tree access. **International Journal of Forest Engineering**, Taylor & Francis, v. 17, n. 2, p. 35–50, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14942119.2006.10702534>>.

PINARD, M. A.; PUTZ, F. E.; TAY, J.; SULLIVAN, T. E. Creating timber harvest guidelines for a reduced-impact logging project in Malaysia. **Journal of Forestry**, v. 93, n. 10, p. 41–45, 1995.

RIBEIRO, C. A. A. S.; MARCATTI, G. E.; MUNARETTI, A. M.; SILVA, K. E. da; ALMEIDA, D. R. A. de; VASCONCELOS, R. dos S.; NETO, E. L. V. **Otimização do traçado de trilhas para acesso a recursos florestais naturais**. Manaus, AM: Embrapa Amazônia Ocidental, 2017. 99 p. ISSN 1517-3135.

SABOGAL, C.; LENTINI, M.; POKORNY, B.; SILVA, J. N. M.; ZWEEDE, J.; VERÍSSIMO, A.; BOSCOLO, M. **Manejo florestal empresarial na Amazônia Brasileira: Restrições e oportunidades**. Belém, PA: Center for International Forestry Research - Cifor, 2006. 72 p. ISBN 979-24-4635-4.

SESSIONS, J.; BOSTON, K.; WING, M. G.; AKAY, A. E.; THEISEN, P.; HEINRICH, R. **Forest road operations in the tropics**. New York, NY, USA: Springer International Publishing, 2007. 170 p. ISBN 978-3-540-46392-4.

SILVA, E. F. da; SILVA, G. F. da; FIGUEIREDO, E. O.; BINOTI, D. H. B.; MENDONÇA, A. R. de; TORRES, C. M. M. E.; PEZZOPANE, J. E. M. Allocation of storage yards in management plans in the Amazon by means of mathematical programming. **Forests**, Basel, Switzerland, v. 9, n. 3, p. 1–20, mar. 2018. ISSN 1999-4907. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f9030127>>.

SILVA, R. F. da; URRUTIA, S. A general VNS heuristic for the traveling salesman problem with time windows. **Discrete Optimization**, Amsterdam, Netherlands, v. 7, n. 4, p. 203–211, nov. 2010. ISSN 1572-5286. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.disopt.2010.04.002>>.

SIST, P. Reduced-impact logging in the tropics: objectives, principles and impacts. **The International Forestry Review**, Commonwealth Forestry Association, v. 2, n. 1, p. 3–10, 2000. ISSN 14655489, 20537778. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/42609931>>.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. 1. ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2013. 624 p. ISBN 978-0-470-27858-1.

WALKER, R.; ARIMA, E.; MESSINA, J.; SOARES-FILHO, B.; PERZ, S.; VERGARA, D.; SALES, M.; PEREIRA, R.; CASTRO, W. Modeling spatial decisions with graph theory: logging roads and forest fragmentation in the brazilian amazon. **Ecological Applications**, v. 23, n. 1, p. 239–254, 2013. ISSN 1051-0761. Disponível em: <<https://doi.org/10.1890/11-1800.1>>.

ZIVIANI, N. **Projeto de algoritmos: com implementações em pascal e c**. 3. ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2013. 639 p. ISBN 978-85-221-1050-6.

## 6 CAPÍTULO 3 - PLANEJAMENTO INTEGRADO DAS INFRAESTRUTURAS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM MFS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

### RESUMO

O planejamento da alocação de infraestruturas para a exploração em florestas nativas tem um papel importante na redução dos custos e danos ambientais. Tradicionalmente, empresas do ramo planejam manualmente as infraestruturas para a exploração, o que demanda muito tempo e esforço e inviabiliza que o tomador de decisões possa avaliar vários cenários e planejar tais estruturas de forma integrada. O objetivo desta pesquisa foi avaliar duas estratégias que combinam técnicas computacionais para a integração da alocação das infraestruturas necessárias a exploração em florestas nativas. A área de estudo foi uma floresta nativa sob regime de MFS localizada na Amazônia brasileira. Foram formuladas três instâncias para a solução. As duas metodologias envolveram o uso de métodos exatos e aproximativos na alocação das infraestruturas. Os resultados indicam que a localização dos pátios influencia diretamente a otimização da alocação das estradas e trilhas de arraste, assim, é fundamental que o gestor avalie vários cenários considerando diferentes quantitativos de pátios para tomar a decisão. Concluiu-se também que o planejamento integrado possibilita obter melhores resultados, pois é possível realizar a escolha do planejamento com base na melhor solução global, que combina o conjunto das infraestruturas.

**Palavras-chave:** Meta-heurísticas; infraestruturas florestais; Sistemas de informação geográfica; Floresta tropical; Otimização do planejamento.

## CHAPTER 3 – INTEGRATED PLANNING OF MFS FORESTRY INFRASTRUCTURES IN BRAZILIAN AMAZON

### ABSTRACT

Planning allocation infrastructure for exploitation in native forests plays an important role in reducing costs and environmental damage. Traditionally, companies manually plan infrastructures for exploration, which takes a lot of time and effort makes it impossible for the decision maker to evaluate various scenarios and plan such structures an integrated manner. The objective of this research was evaluate two strategies that combine computational techniques for integrating allocation of infrastructures necessary for exploitation in native forests. The study area was native forest under MFS regime located in Brazilian Amazon. Three instances were formulated for solution. Both methodologies involved the use exact and approximate methods in allocation infrastructures. The results indicate that location storage yards directly influences optimization forest road and trail, so it is essential that manager assess various scenarios considering different storage yard quantities to make the decision. It was also concluded that integrated planning enables better results, as it is possible choose planning based on best overall solution that combines set of infrastructures.

**Keywords:** Metaheuristics; Forest infrastructures; Geographic information system; Tropical forest; optimized planning.

## 6.1 INTRODUÇÃO

Dentre as atividades de exploração madeireira em um PMFS legalmente aprovado, as construções das infraestruturas de exploração estão entre as que causam maior impacto ambiental, gerando áreas degradadas por corte de árvores, aterro, abertura de áreas, fragmentação, entre outras (BOWMAN; HESSLER, 1983; EZZATI et al., 2015; HOLMES et al., 2002; PORTUGAL; MACHADO; SILVA, 2013; SILVA et al., 2018a).

As infraestruturas de exploração incluem a definição de estradas principais, estradas de acesso, entre outras que são necessárias ao plano de infraestruturas que deverá ser realizado no microplanejamento, como: estradas secundárias, pátios de estocagem e trilhas (AKAY, 2006; EPSTEIN et al., 2006; SESSIONS et al., 2007; SILVA et al., 2018a).

A construção das infraestruturas em regime de MFS envolve fatores específicos, como: períodos prolongados de chuva intensa, presença de brejos, presença de áreas de preservação permanente, de árvores protegidas por lei e a colheita em sistema policíclico, comumente adotado em manejo de baixo impacto, que pode resultar em baixa receita, limitando assim os investimentos. Além disso, a construção e a manutenção de estradas, principal item das infraestruturas, estão entre os de maior custo dentre as atividades de manejo florestal (EPSTEIN et al., 2006; SESSIONS et al., 2007; SILVA et al., 2018a). Isso ocorre porque as operações florestais são diretamente influenciadas pela rede de estradas utilizadas nas variadas operações, como: inventário, tratamentos silviculturais, abate de árvores, arraste e transporte. A qualidade das estradas, por exemplo, afeta o tempo de transporte, a manutenção dos veículos e os acidentes de trânsito (MACHADO, 2013).

Por outro lado, os pátios de estocagem e as trilhas de arraste são fundamentais no planejamento em manejo florestal, pois, similar às estradas florestais, os pátios e as trilhas também estão diretamente relacionados aos custos da exploração e aos danos ambientais (CONTRERAS; CHUNG, 2007; SILVA et al., 2018a; SØVDE; LØKKETANGEN; TALBOT, 2013).

Embora reconhecidas essas infraestruturas, sua definição é complexa devido à diversidade de espécies, ao tamanho das árvores, aos diferentes tipos de floresta, o padrão de distribuição das espécies, o tipo de solo, o relevo, a hidrografia, entre

outros fatores (BRAZ, 2005; EPSTEIN et al., 2006; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007), de forma que, encontra-se na literatura esforços no sentido de otimizar o traçado das estradas florestais (ARIMA et al., 2008; HAYATI; ABDI, 2012; PICARD; GAZULL; FREYCON, 2006; WALKER et al., 2013), de otimizar a alocação de pátios de estocagem (CONTRERAS; CHUNG, 2007; PHILIPPART et al., 2012; SILVA et al., 2018a; SILVA et al., 2018b) e por fim, de otimizar o traçado das trilhas de arraste (EZZATI et al., 2015; STERENCZAK; MOSKALIK, 2015; SØVDE; LØKKETANGEN; TALBOT, 2013).

Contudo, a otimização da alocação integrada dessas infraestruturas deve ser investigada e, com isso, responder a seguinte questão: a alocação integrada das infraestruturas resultará em um arranjo que produz uma melhor relação entre as estruturas promovendo menor dano à floresta remanescente e redução de custos?

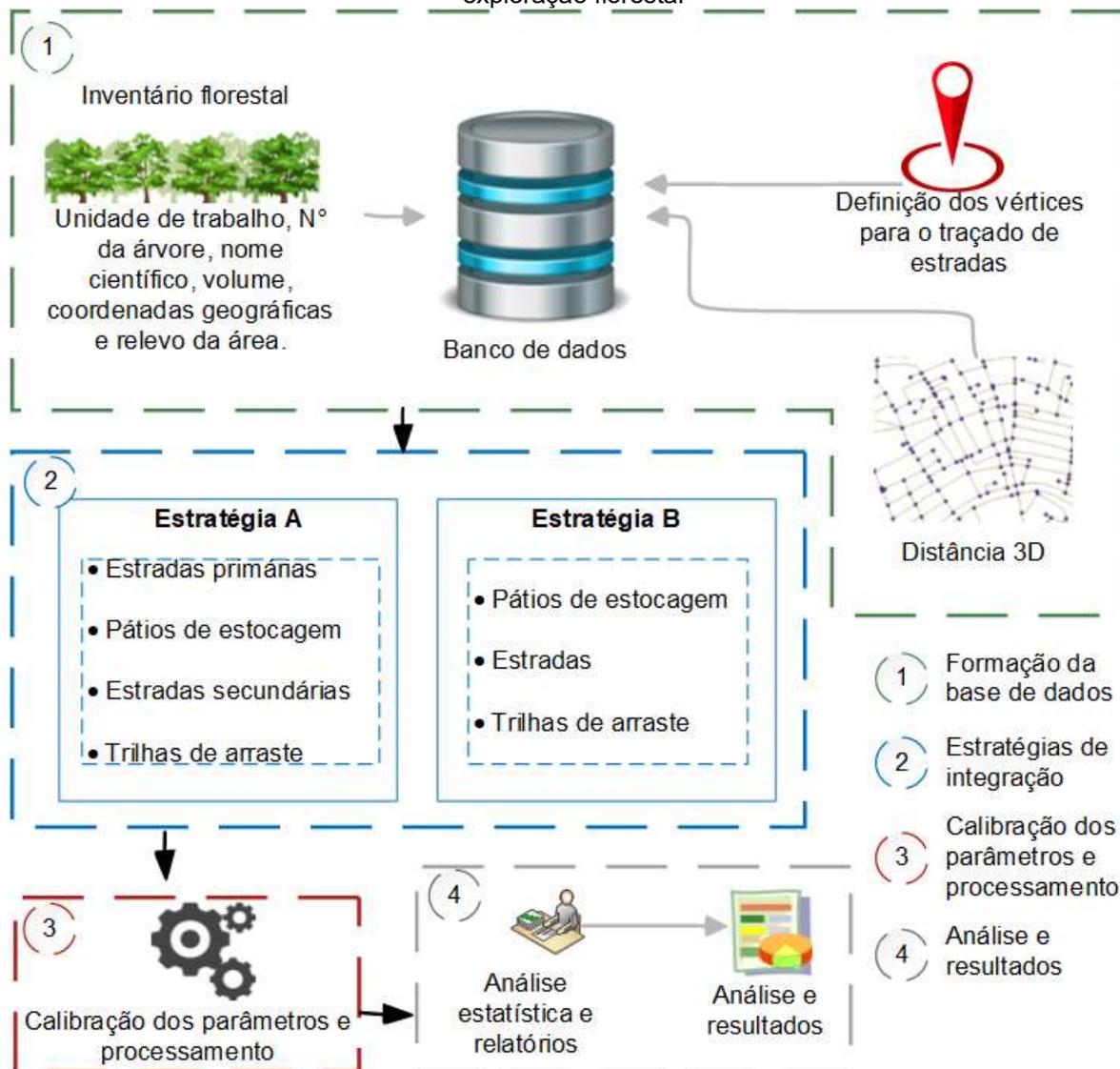
Com isso, ao integrar este planejamento, surge então outra questão: O planejamento integrado das infraestruturas deve iniciar pela alocação dos pátios de estocagem ou pelo traçado de estradas? Tradicionalmente as empresas que adotam o arranjo sistemático determinam inicialmente o traçado em linha reta das estradas primárias, na sequência as estradas secundárias, também em linhas retas, e os pátios são alocados ao longo destas estradas (Figura 20a e Seção 2). Contudo, este tipo de arranjo não promove a melhor relação custo x benefício x impacto ambiental (AMARAL et al., 1998; BRAZ, 1997; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; SILVA et al., 2018a).

Diante do exposto, o objetivo deste capítulo foi avaliar duas metodologias para a integração do planejamento das principais infraestruturas necessárias às atividades de exploração madeireira em floresta nativa na Amazônia.

## 6.2 MATERIAL E MÉTODOS

Para propor uma metodologia para a integração do planejamento das infraestruturas foi conduzida uma sequência de passos com o objetivo de combinar o planejamento da alocação de pátios, do traçado de estradas e trilhas de arraste e avaliar duas estratégias válidas para esta combinação. O esquema metodológico (Figura 46) representa as etapas necessárias para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Figura 46. Fluxograma metodológico da integração do planejamento das infraestruturas de exploração florestal

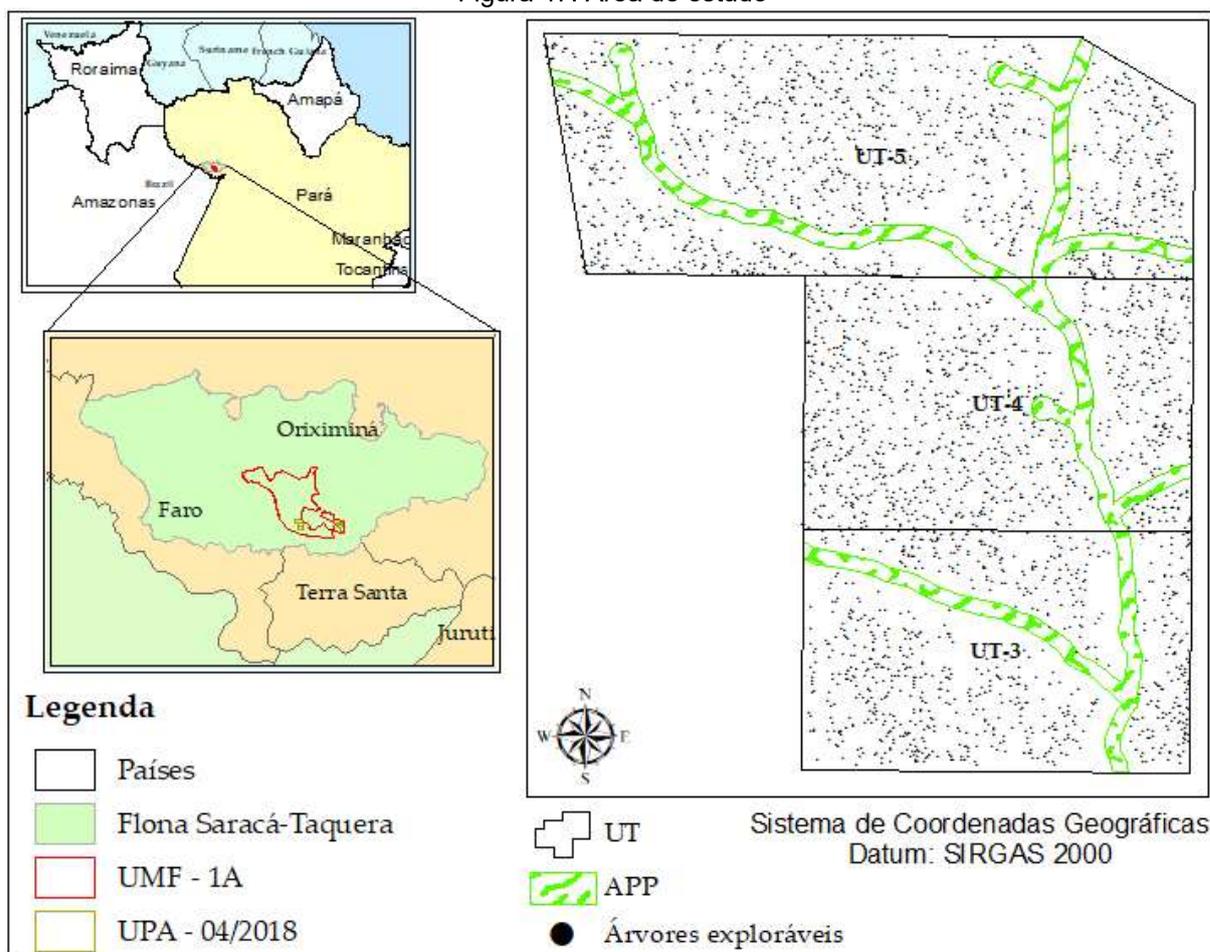


Fonte: O autor.

### 6.2.1 Etapa 1 do fluxograma: Formação da base de dados

Neste estudo, foi utilizada uma área, denominada Unidade de Manejo Florestal (UMF) 1A, que possui 26.897,96 hectares e está localizada na coordenada geográfica 1°45'23" S e 56°34'21" W, situada nos municípios de Terra Santa e Oriximiná, Pará. Esta área pertence à Floresta Nacional (FLONA) Saracá-Taquera. A UMF 1A foi concedida a empresa EBATA Produtos Florestais por meio de concessão florestal, concorrência N° 02/2012, promovida pelo Serviço Florestal Brasileiro, nos termos da Lei n° 11.284/2006 e do Decreto n° 6.063/2007. A área de aplicação do estudo está localizada na UPA 04/2018, nas UTs 03, 04 e 05 (Figura 47).

Figura 47. Área de estudo



Fonte: O autor.

Foi construído um grafo com base em cada Unidade de Trabalho utilizada neste estudo. Para isso foi utilizado um sistema de informação geográfica (SIG) em que foi realizada a distribuição uniforme de vértices equidistantes a 30 m. Foram obtidas as informações de inventário florestal censitário com informações de árvores comerciais, árvores remanescentes, nascentes e áreas de preservação permanente. Estas informações são necessárias para a determinação das áreas inaptas e favoráveis a alocação das infraestruturas.

As unidades de trabalho, UT-3, UT-4 e UT-5, da UMF 1A foram utilizadas para formar 3 instâncias (Tabela 8 e Seção 5). A combinação entre as unidades de trabalho para formar as instâncias teve dois objetivos: primeiro, demonstrar que é possível realizar o planejamento em nível de UPA (áreas extensas) e segundo; formar instâncias maiores para avaliar o desempenho dos métodos implementados.

Para planejar as infraestruturas para a área de estudo, foi construído um programa de computador em linguagem C versão ISO/IEC 9899:2011. A primeira etapa do programa realiza um pré-processamento (Figura 48) cuja finalidade é:

importar os dados do grafo; do inventário florestal; de relevo da área; calcular as distâncias entre os vértices do grafo e seus vizinhos; importar os dados de pátios e calcular as distâncias entre os possíveis locais de alocação de pátio de estocagem e as árvores exploráveis; e cruzar as informações dos vértices e arestas do grafo com as informações de inventário florestal.

Figura 48. Pseudocódigo do pré-processamento de alocação de infraestruturas

1	<code>ar ← lerInstanciaGrafoArea(arquivoAG)</code>
2	<code>arvRem ← lerInstanciaArvoresRemanescentes(arquivoAR)</code>
3	<code>arvExp ← lerInstanciaArvoresExploraveis(arquivoAE)</code>
4	<code>nasc ← lerInstanciaNascentes(arquivoN)</code>
5	<code>app ← lerInstanciaAPP(arquivoAPP)</code>
6	<code>relevo ← lerInstanciaRelevo(arquivoRelevo)</code>
7	<code>acessosEstradas ← lerPontosAcessoEstradas(pontosAE)</code>
8	
9	<code>gr ← criaGrafo(ar)</code>
10	<code>insereArestasGrafo(gr, arvRem, nasc, app)</code>
11	<code>posPatios ← lerInstanciaPatios(arquivoPP)</code>
12	<code>distanciasArvPat ← lerDistancias3D(arquivoDist)</code>

Fonte: O autor.

As primeiras instruções do pré-processamento (Figura 48) são responsáveis pela importação dos dados do inventário florestal censitário para o ambiente de processamento do programa (linhas 1 a 5). A seguir são importados os dados de relevo com a inclinação do terreno e as áreas suscetíveis ao acúmulo de água (linha 6). Na sequência são importados os pontos que indicam os acessos de estrada para a UT (linha 7). Essa informação permitirá determinar a posição de início das estradas florestais para a exploração. Neste estudo, adotou-se os pontos de acesso obtidos no planejamento realizado pela empresa florestal EBATA (Tabela 14). Os pontos de acesso também são referência para o início e término do traçado de estradas primárias.

Tabela 14. Pontos de início e término adotados no planejamento de estradas primárias conforme planejamento realizado pela empresa EBATA

UT	Posicionamento geográfico			Extensão (m)
	Trecho	Início	Término	
UT-3	1	1°49'51.913"S 56°33'9.884"W	1°49'19.672"S 56°33'17.660"W	1.495,15
	2	1°49'44.091"S 56°32'45.610"W	1°49'44.092"S 56°32'49.494"W	
	3	1°49'28.458"S 56°32'45.614"W	1°49'28.459"S 56°32'49.498"W	
UT-3; UT-4	1	1°49'51.913"S 56°33'9.884"W	1°48'45.477"S 56°33'26.408"W	3.074,39
	2	1°49'44.091"S 56°32'45.610"W	1°49'44.092"S 56°32'49.494"W	
	3	1°49'28.458"S 56°32'45.614"W	1°49'28.459"S 56°32'49.498"W	
	4	1°49'3.054"S 56°32'45.620"W	1°49'3.056"S 56°32'53.388"W	
UT-3; UT-4; UT-5	1	1°49'51.913"S 56°33'9.884"W	1°48'35.710"S 56°33'42.012"W	4.177,07
	2	1°49'44.091"S 56°32'45.610"W	1°49'44.092"S 56°32'49.494"W	
	3	1°49'28.458"S 56°32'45.614"W	1°49'28.459"S 56°32'49.498"W	
	4	1°49'3.054"S 56°32'45.620"W	1°49'3.056"S 56°32'53.388"W	
	5	1°48'34.719"S 56°32'45.693"W	1°48'34.721"S 56°32'53.462"W	

Nota: As coordenadas geográficas e a densidade foram obtidas por meio de um SIG.

Fonte: O autor.

A etapa seguinte ao pré-processamento é a construção da estrutura de dados do grafo com base nos vértices importados e na distância calculada entre os vértices (linhas 9 e 10). A função `insereArestasGrafo()` se baseia na distância entre os vértices para determinar quais são os vértices vizinhos de um vértice  $i$  e para cada vértice identificado como vizinho de  $i$ , é criada uma aresta de ligação entre os dois vértices. Para o cálculo da distância, foi utilizada a distância 3D conforme metodologia empregada em Ribeiro et al. (2017).

Essa distância considera a altitude, o que permite obter maior precisão ao calcular a distância entre dois pontos, tendo em vista que normalmente os terrenos apresentam algum grau de declividade. Assim, ao determinar o caminho de menor comprimento, o método, seja ele exato ou meta-heurística, evitará naturalmente as áreas de declividade acentuada, uma vez que, nestes casos, a distância será maior.

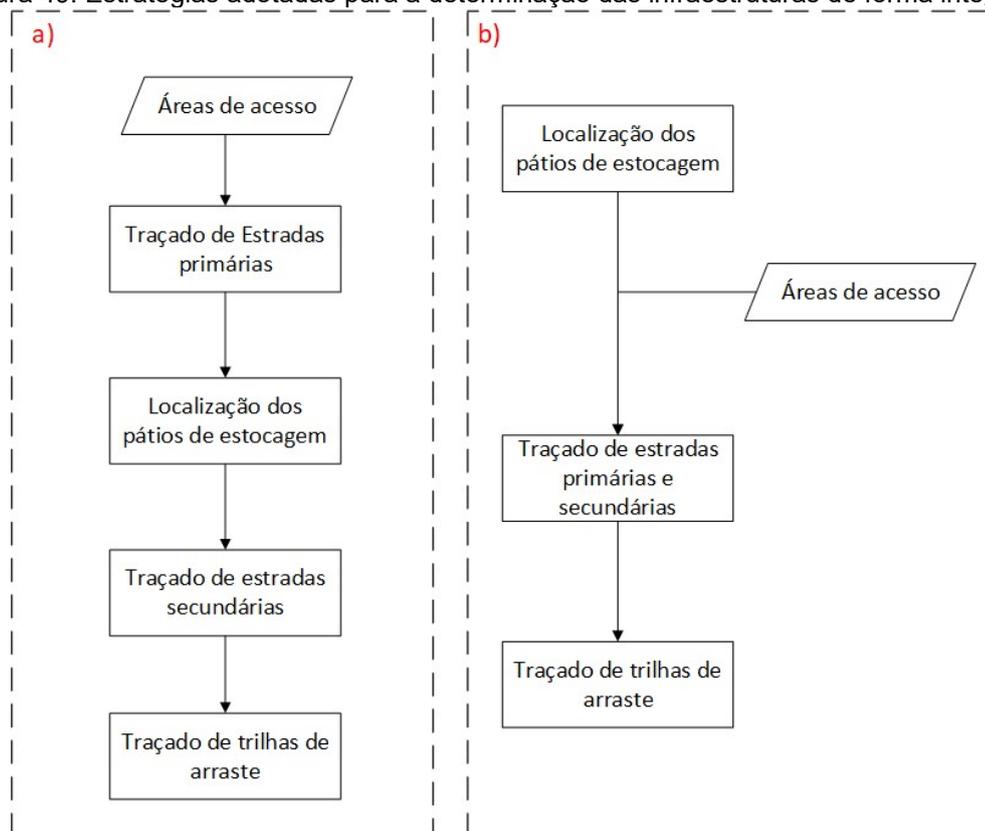
As funções seguintes são responsáveis por importar os dados de possíveis locais de alocação de pátios e importar as distâncias 3D entre pátios e árvores exploráveis (linhas 11 e 12). A função `lerDistancias3D()` (linha 12) é responsável pela importação das distâncias entre os possíveis locais de pátio e as árvores

exploráveis, sendo que ao final do processo, é formada uma matriz (N:M) em que pode-se obter a distância de um possível pátio para qualquer árvore explorável.

### 6.2.2 Etapa 2 do fluxograma: Estratégias de integração

Em linhas gerais, há duas possíveis estratégias que podem ser adotadas para a determinação das infraestruturas de exploração em floresta nativa. Na primeira (Figura 49a), as estradas primárias são definidas, na sequência os pátios e a seguir, as estradas secundárias são obtidas considerando a localização das estradas primárias e dos pátios. Por fim, as trilhas são definidas considerando a localização dos pátios e das árvores exploráveis. Na segunda estratégia (Figura 49b), são inicialmente definidas as localizações dos pátios. Com base em sua localização e nas áreas de acesso à UT são então definidas as estradas, sejam elas primárias ou secundárias e as trilhas são igualmente definidas considerando a localização dos pátios e das árvores exploráveis.

Figura 49. Estratégias adotadas para a determinação das infraestruturas de forma integrada



Fonte: O autor.

A seguir são detalhados os passos para a execução das duas estratégias.

### 6.2.2.1 Estratégia A de definição das infraestruturas

Para a estratégia A, foi construída uma heurística que avalia todos os pontos de início e término para as estradas primárias e invoca o algoritmo Dijkstra responsável pela determinação do traçado, conforme metodologia descrita no Capítulo 2. Na sequência a heurística aciona o SA responsável pela localização dos pátios de estocagem, conforme metodologia adotada no Capítulo 1. A etapa seguinte envolve determinar o traçado das estradas secundárias, Neste caso também foi utilizado o Dijkstra conforme descrito no Capítulo 2. Como as estradas secundárias fazem a ligação entre as estradas primárias e os pátios de estocagem, adotou-se a estratégia de realizar a ligação sempre entre os dois pontos mais próximos, sejam eles entre um trecho de estrada e um pátio, ou entre um pátio e outro pátio.

Após identificar os pontos mais próximos, o algoritmo Dijkstra é invocado para determinar o menor caminho. Para combinar a aplicação do algoritmo Dijkstra com a determinação dos pontos de ligação entre pátios de estocagem e estrada primária ou estrada secundária, foi desenvolvida uma heurística de ligação de estradas secundárias (HLES) (Figura 50).

Figura 50. Heurística de ligação de estradas secundárias (HLES)

1	HLES(area, patios)
2	<b>para</b> todo patio $\in$ patios <b>faça</b>
3	distEstPri $\leftarrow$ obterEstPrimariaProxima(patio)
4	distEstSec $\leftarrow$ obterEstSecundariaProxima(patio)
5	distPatio $\leftarrow$ obterPatioProximo(patio)
6	<b>se</b> distEstPri $\neq$ 0 <b>e</b> distEstSec $\neq$ 0 <b>então</b>
7	<b>se</b> distEstPri < distEstSec <b>e</b> distEstPri < distPatio <b>então</b>
8	sol $\leftarrow$ Dijkstra(area, patio, estradaPrimaria)
9	<b>senão se</b> distEstSec < distEstPri <b>e</b> distEstSec < distPatio <b>então</b>
10	sol $\leftarrow$ Dijkstra(area, patio, estradaSecundaria)
11	<b>senão</b>
12	sol $\leftarrow$ Dijkstra(area, patio, patioProximo)
13	atualizaLigacoesPatios(patio, sol)
14	<b>fim se</b>
15	atualizaEstradasSecundarias(sol)
16	<b>fim se</b>
17	<b>fim para</b>

Fonte: O autor.

Conforme pode-se observar no pseudocódigo (Figura 50), a HLES percorre todos os pátios alocados (linha 2) e para cada iteração, obtém as distâncias entre o pátio avaliado e os pontos mais próximos de estrada primária, pátio de estocagem e estrada secundária (linhas 3-5). Na sequência avalia qual desses pontos está mais

próximo e realiza a ligação (linhas 7-12). Se um pátio foi ligado a outro pátio, então as ligações entre pátios devem ser atualizadas (linha 13) para evitar que ocorra uma ligação duplicada entre os pátios já ligados. Por fim, as estradas secundárias são atualizadas (linha 15), assim, a estrada que acabou de ser definida será considerada como possível ponto de ligação para os pátios restantes.

A última etapa envolve a definição do traçado das trilhas primárias de arraste, em que, conforme a metodologia descrita na seção 6.2.3, inicialmente são definidos os pontos de maior densidade de árvores de acordo com o mínimo necessário de trilhas primárias e na sequência o método é aplicado para a obtenção do traçado.

#### 6.2.2.2 Estratégia B de definição das infraestruturas

Na estratégia B, inicialmente foi acionado o SA para a obtenção da localização dos pátios, conforme a metodologia descrita no Capítulo 1. A etapa seguinte é a obtenção do traçado das estradas primárias e secundárias com base na localização dos pontos de acesso da UT (Tabela 14) e dos pátios de estocagem definidos durante a etapa anterior. Para isso foi utilizado o Dijkstra conforme descrito no Capítulo 2. Por fim, são definidas as trilhas de arraste conforme metodologia descrita na seção 6.2.3.

Nesta estratégia o tipo da estrada, se primária ou secundária, é definido conforme o fluxo de escoamento do volume de madeira, de forma que, estradas que receberam um maior volume para o escoamento foram consideradas primárias e estradas que receberam um menor volume para o escoamento foram consideradas secundárias. O volume utilizado como referência é o equivalente à capacidade de três pátios.

Como as estradas farão a ligação entre os pontos de acesso e os pátios de estocagem, adotou-se a estratégia de realizar a ligação sempre entre os dois pontos mais próximos, sejam eles, entre um ponto de acesso e um pátio, ou entre uma estrada e um pátio ou ainda entre um pátio e outro pátio. Para realizar a ligação até a estrada, observou-se também a garantia do fluxo de escoamento do transporte da madeira. Para a adoção destas estratégias, construiu-se uma heurística para a ligação das estradas e pátios conforme o pseudocódigo (Figura 51).

Figura 51. Heurística de ligação de pátios de estocagem (HLP)

```

1 HLP(area, patios, areasAcesso)
2   para todo i ∈ patios faça
3     patioAtual ← patios[i]
4     acesso ← obterAcessoProximo(patioAtual, distAcesso, areasAcesso)
5     estExistente ← obterEstExistenteProxima(patioAtual, distEst)
6     se distAcesso <> 0 e distEst <> 0 então
7       patioProximo ← obterPatioProximo(patioAtual, distPatio)
8       se patioProximo e distPatio < distAcesso e distPatio < distEst então
9         solEstrada ← Dijkstra(area, patioAtual, patioProximo)
10        estabeleceLigacaoProibida(patioAtual, patioProximo)
11      senão se distAcesso < distEst e distAcesso < distPatio então
12        solEstrada ← Dijkstra(area, patioAtual, acesso)
13      senão
14        solEstrada ← Dijkstra(area, patioAtual, estExistente)
15      fim se
16      atualizaEstradasExistentes(solEstrada)
17      solTotal[i] ← solEstrada
18    fim se
19  fim para
20  patioSaidaUT ← obterPatioProximo(areasAcesso, distanciaPatio)
21  solEstrada ← Dijkstra(area, patioSaidaUT, areasAcesso)
22  solTotal[i+1] ← solEstrada
23  determinarTipoEstrada(solTotal)
24  retorna solTotal

```

Fonte: O autor.

Conforme o pseudocódigo apresentado (Figura 51), a heurística, aqui denominada como Heurística de Ligação de Pátios (HLP) requer como parâmetros de entrada: a solução contendo os pátios de estocagem; o grafo com os vértices e arestas da área e os pontos de acesso contendo as entradas e a saída da UT. Para obter o traçado, a HLP percorre todos os pátios de estocagem (linhas 2-19) e para cada pátio executa os seguintes procedimentos: obtém o ponto de acesso mais próximo do pátio e a distância até ele (linha 4); obtém o ponto de estrada existente mais próximo do pátio que atenda ao fluxo de escoamento e a distância até ele (linha 5) verifica se a distância até o ponto de acesso ou até a estrada mais próxima é diferente de zero (linha 6), pois caso não seja, o pátio está localizado em um ponto em que já existe uma estrada e não é necessário um trecho de estrada para ele.

Caso a distância até o ponto de acesso ou estrada mais próxima, seja diferente de zero, então a HLP busca o pátio mais próximo do pátio atual (linha 7). Para isso, a busca considera que a distância do pátio mais próximo até o ponto de acesso, o mais próximo do pátio atual, deve ser inferior à distância do pátio atual até o seu ponto de acesso mais próximo. Esse critério garante que os traçados sejam sempre localizados de acordo com o fluxo de escoamento. Dessa forma, priorizou-se o aspecto técnico, importante à viabilidade do manejo, em detrimento da

minimização da extensão do trecho, pois um pátio mais próximo que o ponto de acesso, pode vir a ser descartado por estar em uma localização que inviabilize a garantia do fluxo de escoamento.

Na sequência, a HLP verifica se o pátio próximo existe e se a distância até ele é inferior à distância do pátio atual até o ponto de acesso e trecho de estrada mais próximos (linha 8). Em caso positivo, o Dijkstra obtém a solução com o caminho mínimo (linha 9), atendendo aos requisitos do MFS, entre o pátio atual e o pátio mais próximo. E estabelece uma ligação proibida entre os pátios (linha 10), assim, quando o pátio, considerado o mais próximo, for avaliado, a HLP não estabelecerá uma dupla ligação entre eles.

Se a condição (linha 8) for falsa, então a HLP verifica se o ponto mais próximo do pátio atual é o ponto de acesso da área (linha 11). Em caso positivo, o Dijkstra obtém uma solução do caminho mínimo (linha 12), entre o pátio atual e o acesso mais próximo. Se nenhuma das duas validações for verdadeira, então o pátio está mais próximo de um trecho existente de estrada, assim, o Dijkstra é acionado para estabelecer a conexão entre o pátio e a estrada (linha 14). Após definir o traçado da estrada, o conjunto de estradas existentes é atualizado (linha 16) para que o trecho novo incluído possa ser considerado como trecho de ligação na próxima iteração.

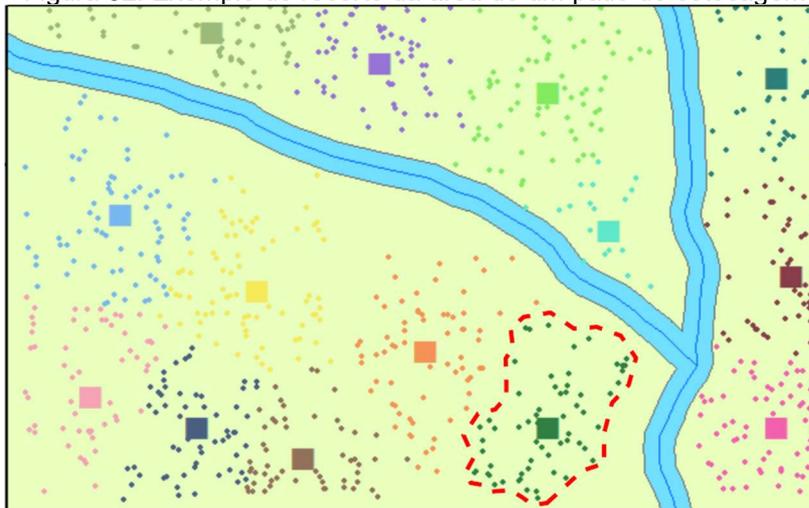
A solução obtida dos passos anteriores é então adicionada à um conjunto de soluções (linha 17) que tem o objetivo de armazenar todas as soluções na HLP. Ao concluir a análise de todos os pátios, a HLP obtém o pátio mais próximo do ponto de saída da UT (linha 20) e gera uma última solução pelo Dijkstra entre o pátio mais próximo e a saída da UT (linha 21). O penúltimo passo envolve acionar a função responsável por avaliar o fluxo de escoamento nas estradas e definir quais os trechos serão de estradas primárias e secundárias (linha 23). Por fim, a solução contendo todos os trechos é retornada (linha 24).

### 6.2.2.3 Definição do traçado de trilhas de arraste

Para as trilhas é recomendável o arraste de no máximo 15 árvores em cada trilha primária, no arraste mecanizado (AMARAL et al., 1998; FFT, 2002; PINARD et al., 1995). Além disso, o ideal é que as trilhas primárias sejam direcionadas até as áreas de maior densidade de árvores. Neste sentido, foi adotada uma estratégia em três etapas para a obtenção do traçado das trilhas primárias. A primeira etapa

envolve o recorte da área do pátio em que a sua delimitação foi obtida pelas árvores mais distantes, conforme exemplificado pela linha tracejada (Figura 52).

Figura 52. Exemplo de recorte da área de um pátio de estocagem



Fonte: O autor.

Há dois objetivos ao realizar o recorte da área do pátio, o primeiro é reduzir a complexidade do problema pela diminuição do número de variáveis e, com isso, obter resposta em menor tempo de processamento. O segundo objetivo é limitar a região de atuação do método para evitar soluções inviáveis. Após definição da área do pátio de estocagem, é iniciada a segunda etapa, em que foi aplicado nesta área, o SA para o problema de localização, considerando o número mínimo de trilhas primárias que devem ser abertas.

Assim, o objetivo da segunda etapa é identificar os pontos de maior densidade de árvores pela minimização de distâncias entre elas. Para determinar o número mínimo de trilhas, dividiu-se o total de árvores associadas ao pátio por 15, conforme recomendado na exploração de impacto reduzido (AMARAL et al., 1998; FFT, 2002; PINARD et al., 1995). Após a obtenção dos pontos de maior densidade de árvores, é iniciada a terceira etapa, em que foi aplicado o algoritmo Dijkstra do pátio até os pontos obtidos na segunda etapa.

O algoritmo Dijkstra levou em consideração apenas os desvios de árvores remanescentes, pois as demais variáveis podem ser desprezadas, uma vez que: em função do recorte, os vértices de APP não são incluídos na área do pátio, na área adotada neste estudo não há ocorrência de áreas com inclinação superior à  $45^\circ$ . Assim todas as áreas são passíveis de abertura de trilhas de arraste e como as trilhas são faixas provisórias, não há necessidade de evitar áreas suscetíveis ao

acúmulo de água. Para executar as três etapas, foi construída uma heurística conforme o pseudocódigo (Figura 53).

Figura 53. Pseudocódigo da heurística para definição do traçado de trilhas de arraste (HTTA)

```

1 HTTA(patios, arvoresPatios)
2   para todo i ∈ patios faça
3     patioAtual ← patios[i]
4     arvores ← arvoresPatios[i]
5     areaPatio ← obterAreaPatio(patioAtual, arvoresPatios)
6     solPTTrilhas ← heuConstrutiva(areaPatio, qtdeTrilhas)
7     solPTTrilhas ← simulatedAnnealing(solPTTrilhas, areaPatio, qtdeTrilhas)
8     solTrilhas ← heuTrilhas(areaPatio, solPTTrilhas, qtdeTrilhas)
9   fim para
10  retorna solTrilhas

```

Fonte: O autor.

Conforme a Figura 53, a heurística para definição do traçado de trilhas de arraste (HTTA) percorre todos os pátios (linha 2). E, para cada pátio, obtém a sua área com base nas árvores associadas a ele (linhas 3-5). Após obter a área do pátio, aplica a heurística construtiva (linha 6) para gerar uma solução inicial de pontos de localização de trilhas em áreas de maior densidade de árvores. Após obter a solução inicial é possível executar o SA (linha 7) e melhorar a solução gerada pela heurística construtiva. A última etapa é o acionamento da função responsável por determinar o traçado de trilhas com base nos pontos obtidos pelo SA (linha 8). Esta função, similar as demais heurísticas construídas para o traçado de estradas, se encarrega de ligar a trilha ao pátio ou a uma trilha mais próxima.

### 6.2.3 Etapa 3 do fluxograma: Calibração dos parâmetros

Durante a etapa de definição do traçado de trilhas de arraste, foram utilizados métodos aproximativos, heurística construtiva e o SA, para determinar a localização dos pontos em que há maior densidade de árvores no pátio, conforme o número necessário de trilhas de arraste primárias. Foi então necessário calibrar os parâmetros para o SA. Para isso, adotou-se então a metodologia apresentada em Mauri et al. (2016).

Os parâmetros foram calibrados com o uso da instância 1 – UT-3, em que, foram definidas faixas de valores para os parâmetros. A meta-heurística SA foi executada por cinco vezes para cada possível combinação desses parâmetros e a que produziu o melhor resultado médio de FO foi adotada. Foram calibrados os parâmetros Temperatura inicial, iterações de vizinhança e taxa de resfriamento. A solução inicial foi gerada com a Heurística Construtiva Aleatória (HCA) que requer

um parâmetro de entrada, que é o número de iterações para a obtenção da solução inicial. Os melhores valores obtidos com a calibração dos parâmetros do SA são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Parâmetros de entrada do SA para o problema de localização dos melhores pontos para o traçado das trilhas de arraste primárias

Parâmetro	Faixa de valores	Valor adotado
Temperatura inicial	[1; 5; 10]	10
Temperatura de congelamento	-	0,1
Taxa de resfriamento	[0,90; 0,95; 0,99]	0,99
Iterações de vizinhança	[30; 40; 50]	50
Método de solução inicial	-	HCA
N.º de iterações para a solução inicial	-	20.000

Fonte: O autor.

#### 6.2.4 Etapa 4 do fluxograma: Análise e resultados

A densidade de estradas e trilhas de arraste é afetada pela localização dos pátios de estocagem, uma vez que, os pátios e as árvores são a referência para a determinação de sua localização. Assim, a obtenção da densidade ótima de estradas florestais não é trivial, pois diferentes condições afetarão seu resultado. Por exemplo, uma maior quantidade de pátios de estocagem, em geral, resultará em uma menor extensão de trilhas de arraste, contudo, um efeito inverso é observado nas estradas secundárias.

Desta forma, para avaliar se as estratégias de definição do traçado de estradas são sensíveis às mudanças na configuração dos pátios, definiu-se três cenários para cada instância, em que, o quantitativo de pátios, inicialmente definido (Tabela 1), sofreu alterações para mais ou para menos. A mudança aplicada foi significativa, atribuindo um acréscimo ou decréscimo de 50% no total de pátios alocados para cada instância (Tabela 16).

Tabela 16. Parâmetros adotados para análise de cenários na alocação de infraestruturas para exploração em floresta nativa

Cenário	Instância	Total de pátios que devem ser alocados	Capacidade dos pátios de estocagem (m <sup>3</sup> )	Distância máxima para extração (m)
1	1	14	257,19	379
	2	25	302,55	379
	3	46	259,78	379
2	1	7	514,37	569
	2	13	581,82	569
	3	23	519,56	569
3	1	21	171,46	258
	2	37	204,42	258
	3	69	173,19	258

Fonte: O autor.

Para obter soluções viáveis foi necessário ajustar também os valores adotados para a capacidade dos pátios em termos de volume e a distância máxima de extração. Também foram aplicados 50% de acréscimo e decréscimo nos valores, exceto para o cenário 3, em que foi adotada a distância máxima conforme Silva et al. (2018a), tendo em vista que a distância com 50% de decréscimo ficou muito restritiva, resultando apenas em soluções inviáveis.

Como o procedimento adotado para a determinação da localização dos pátios de estocagem é aproximativo, a cada execução do método, resultados diferentes serão obtidos. Sendo assim, para que a comparação entre as duas estratégias seja justa, os procedimentos foram executados em conjunto, de modo a aproveitar a mesma solução obtida para a localização dos pátios a cada iteração. A determinação da melhor solução de alocação das infraestruturas foi realizada com base na minimização da soma das demais soluções, no caso, solução de pátios de estocagem, solução de estradas e solução de trilhas.

Para os resultados computacionais da alocação de pátios de estocagem foi analisada, para cada instância e cenário, a melhor solução encontrada [Melhor Sol (m)], a média dentre as FO encontradas [Média Sol (m)], o desvio das soluções [Desvio (%)], o tempo de processamento computacional para encontrar a melhor solução [Tempo (minutos)], o tempo médio para obter a melhor solução [Tempo médio (minutos)] e o GAP (%). As médias foram calculadas com base em 30 execuções. O desvio das soluções foi calculado com a Equação 9 (Capítulo 3) conforme a metodologia utilizada em Mauri et al. (2016).

Para avaliar os resultados do traçado de trilhas de arraste, em cada instância e cenário, considerou-se a extensão total das trilhas de arraste [Extensão total (m)], a densidade das trilhas de arraste [Densidade (m.ha<sup>-1</sup>)], a densidade média para todas as soluções obtidas de trilhas de arraste [Densidade média (m.ha<sup>-1</sup>)], a função objetivo da melhor solução de trilhas de arraste [FO total] e o tempo para obter a solução [Tempo Sol (s)]. Os resultados de pátios e trilhas de arraste são comuns as duas estratégias de alocação de infraestruturas, uma vez que, foi utilizada a mesma solução de alocação de pátios nas duas estratégias.

Para avaliar o custo da construção das infraestruturas: pátios de estocagem, estradas primárias, estradas secundárias e trilhas de arraste, adaptou-se os dados de custo provenientes do estudo de Silva (2019).

#### 6.2.4.1 Análise e resultados das Estratégias A e B

Para avaliar os resultados computacionais do traçado de estradas primárias considerou-se para cada instância e trecho de estrada, o comprimento do traçado [Extensão (m)], o comprimento total do traçado [Extensão total (m)], a densidade de estradas primárias [Densidade ( $m \cdot ha^{-1}$ )], a função objetivo [FO] que equivale à extensão do trecho afetada pela penalização das variáveis avaliadas, a função objetivo total [FO total] e o tempo de processamento [Tempo (s)].

No caso das estradas secundárias, considerou-se para cada instância e cenário, a FO da solução de pátios associada às estradas [FO pátios], a extensão total das estradas secundárias [Extensão total (m)], a densidade das estradas secundárias [Densidade ( $m \cdot ha^{-1}$ )], a densidade média para todas as soluções obtidas de estradas secundárias [Densidade média ( $m \cdot ha^{-1}$ )], a função objetivo da melhor solução de estradas secundárias [FO estradas secundárias] e o tempo para obter a solução de estradas secundárias [Tempo Sol (s)].

### 6.3 RESULTADOS

#### 6.3.1 Resultados obtidos para a estratégia A

Inicialmente são apresentados os resultados da melhor solução para a estratégia A. Na sequência são apresentados os resultados computacionais para estradas primárias, pátios de estocagem, estradas secundárias e trilhas.

##### 6.3.1.1 Melhor Solução

Um resumo da extensão e densidade da melhor solução para os cenários avaliados na estratégia A pode ser visualizado na Tabela 17. Observa-se nos resultados que para as três instâncias houve uma diferença considerável na densidade total entre os cenários avaliados. Por exemplo, no cenário 2 da primeira instância, a densidade total é 2% inferior ao cenário 1 e a densidade total do cenário 3 é 5,8% inferior ao cenário 1. Um percentual de 2% de diferença pode parecer pouco, mas deve-se levar em conta que, dentre as áreas avaliadas, a de menor tamanho possui 160 ha.

Tabela 17. Resumo da extensão e densidade de estradas e trilhas da Estratégia A

Instância	Infraestrutura	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Extensão (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Extensão (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Extensão (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )
1	Estradas primárias	1.797,01	11,23	1.797,01	11,23	1.797,01	11,23
	Estradas secundárias	2.326,29	14,54	1.610,39	10,06	3.292,41	20,58
	Trilhas de arraste	5.434,21	33,96	5.954,95	37,22	3.910,14	24,44
<b>Total</b>		<b>9.557,51</b>	<b>59,73</b>	<b>9.362,35</b>	<b>58,51</b>	<b>8.999,56</b>	<b>56,25</b>
2	Estradas primárias	2.992,91	9,12	2.992,91	9,12	2.992,91	9,12
	Estradas secundárias	5.995,46	18,28	3.099,76	9,45	7.200,23	21,95
	Trilhas de arraste	13.281,75	40,49	14.711,11	44,85	11.177,45	34,08
<b>Total</b>		<b>22.270,12</b>	<b>67,89</b>	<b>20.803,78</b>	<b>63,42</b>	<b>21.370,59</b>	<b>65,15</b>
3	Estradas primárias	3.735,16	6,44	3.735,16	6,44	3.735,16	6,44
	Estradas secundárias	12.177,12	20,98	7.342,73	12,65	14.739,86	25,39
	Trilhas de arraste	23.092,46	39,78	26.159,22	45,06	18.619,32	32,07
<b>Total</b>		<b>39.004,74</b>	<b>67,19</b>	<b>37.237,11</b>	<b>64,15</b>	<b>37.094,34</b>	<b>63,90</b>

Fonte: O autor.

Em geral, observa-se que o cenário 2 foi o que resultou em menor densidade total de estradas e trilhas, exceto para a instância 1 (Tabela 17). Esse resultado foi influenciado pela densidade de estradas primárias, pois, como os pontos de início e término de estradas primárias são fixos na estratégia A, então a sua densidade foi reduzida consideravelmente nas instâncias 2 e 3.

Considerando o tamanho de pátio recomendado (Quadro 12) e a largura de faixa de estradas recomendada para a exploração em florestas nativas (Quadro 14), pode-se calcular o impacto da construção de infraestruturas em função da quantidade de área aberta (Tabela 18). Verifica-se que em termos percentuais, o total de área aberta é inferior no segundo cenário para todas as instâncias. Por outro lado, o terceiro cenário causa maior impacto em termos de área aberta total, mas um menor impacto em área aberta por trilha de arraste.

Tabela 18. Impacto das infraestruturas em hectares de área aberta para a implantação de infraestruturas na estratégia A

Instância	Cenário	Impacto em área total									
		Pátios de Estocagem		Estradas Primárias		Estradas Secundárias		Trilhas de Arraste		Total	
		ha	% do total	ha	% do total	ha	% do total	ha	% do total	ha	% do total
1 (160 ha)	1	0,7	0,44			1,40	0,87	2,45	1,53	6,34	3,96
	2	0,35	0,22	1,80	1,12	0,97	0,60	2,68	1,67	5,79	3,62
	3	1,05	0,66			1,98	1,23	1,76	1,10	6,58	4,11
2 (328 ha)	1	1,25	0,38			3,60	1,10	5,98	1,82	13,82	4,21
	2	0,65	0,20	2,99	0,91	1,86	0,57	6,62	2,02	12,12	3,70
	3	1,85	0,56			4,32	1,32	5,03	1,53	14,19	4,33
3 (580,54 ha)	1	2,3	0,40			7,31	1,26	10,39	1,79	23,73	4,09
	2	1,15	0,20	3,74	0,64	4,41	0,76	11,77	2,03	21,06	3,63
	3	3,45	0,59			8,84	1,52	8,38	1,44	24,41	4,20

Fonte: O autor.

Os dados constantes na Tabela 18 foram calculados com base na área total das instâncias. O mesmo cálculo pode ser realizado considerando apenas a área de efetiva exploração, conforme a Tabela 19. Não há, contudo, diferença na área medida em hectares para a implantação das infraestruturas, mas apenas no percentual de área com base na área de efetiva exploração. Pode-se verificar que ao se considerar apenas a área que efetivamente pode ser manejada, o percentual relativo de dano aumenta.

Tabela 19. Impacto das infraestruturas em percentual de área de efetiva exploração para a implantação de infraestruturas na estratégia A

Instância	Cenário	Impacto em área efetiva de exploração (%)				
		Pátios de Estocagem	Estradas primárias	Estradas secundárias	Trilhas de arraste	Total
1 (144,87 ha)	1	0,48		0,96	1,69	4,38
	2	0,24	1,24	0,67	1,85	4,00
	3	0,72		1,36	1,21	4,54
2 (301,32 ha)	1	0,41		1,19	1,98	4,59
	2	0,22	0,99	0,62	2,20	4,02
	3	0,61		1,43	1,67	4,71
3 (526,97 ha)	1	0,44		1,39	1,97	4,50
	2	0,22	0,71	0,84	2,23	4,00
	3	0,65		1,68	1,59	4,63

Fonte: O autor.

Os resultados (Tabela 20) mostram que houve diferença considerável nos custos totais entre os cenários avaliados para as três instâncias. Por exemplo, o cenário 2 da instância 1 é 25% inferior ao cenário 1 e 40% inferior ao cenário 3. O custo total do segundo cenário foi o menor, para as três instâncias, pois embora neste cenário ocorra o aumento de trilhas de arraste, esta infraestrutura tem o menor custo. Por outro lado, ocorre a redução do número de pátios de estocagem e de estradas secundárias, que possuem maior custo.

Tabela 20. Custo de construção das infraestruturas de exploração para a estratégia A

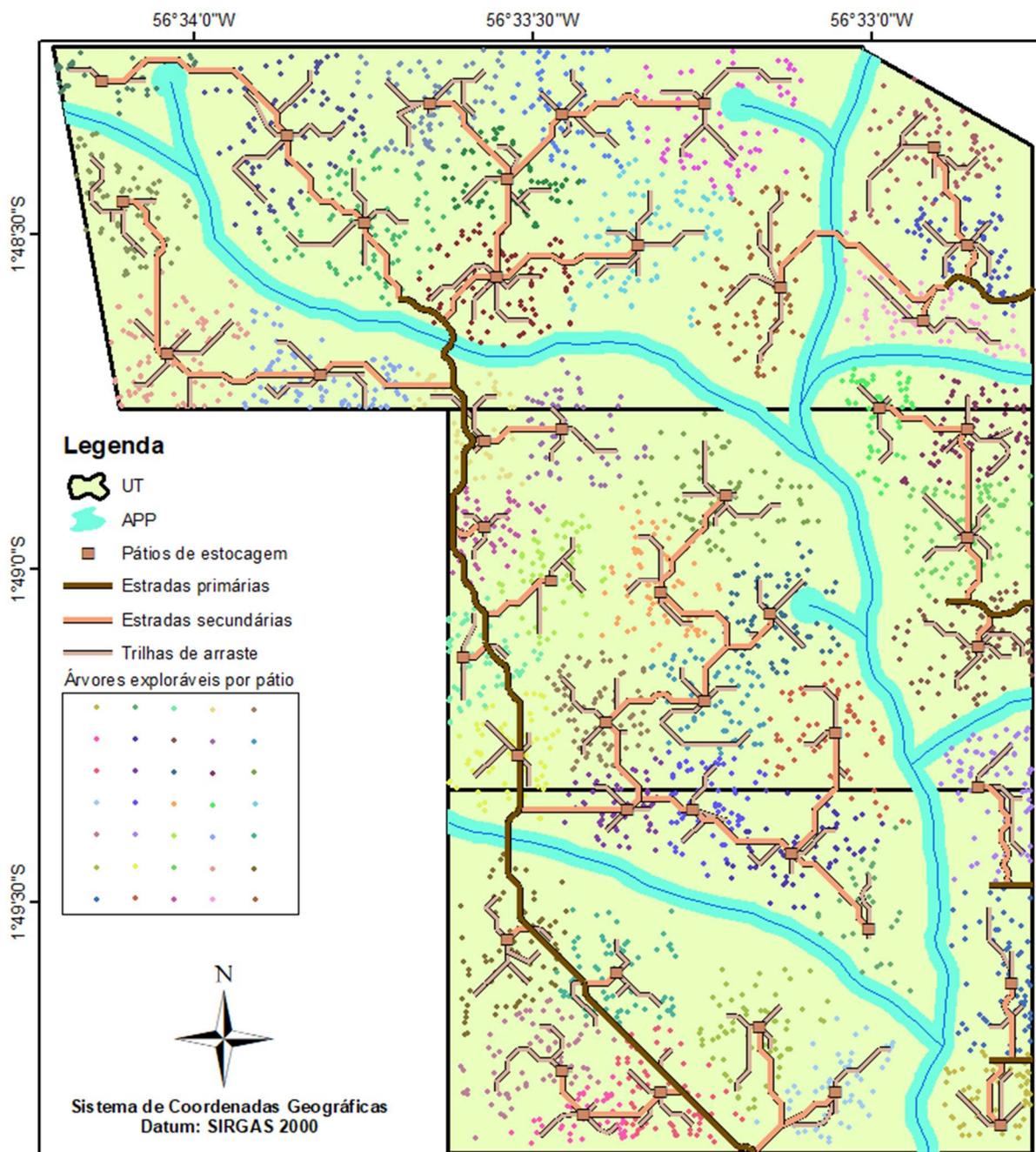
Instância	Cenário	Custo de construção de infraestrutura (R\$)				Total
		Pátios de Estocagem	Estradas primárias	Estradas secundárias	Trilhas de arraste	
1	1	4.389,31		2.559,35	787,43	11.628,06
	2	2.194,66	3.891,96	1.771,73	862,89	8.721,23
	3	6.583,97		3.622,26	566,59	14.664,77
2	1	7.838,05		6.596,12	1.924,57	22.840,77
	2	4.075,79	6.482,03	3.410,31	2.131,69	16.099,81
	3	11.600,32		7.921,58	1.619,65	27.623,58
3	1	14.422,02		13.397,08	3.346,17	39.254,87
	2	7.211,01	8.089,59	8.078,36	3.790,56	27.169,52
	3	21.633,03		16.216,57	2.698,00	48.637,20

Fonte: O autor.

O resultado (Tabela 20) mostra também, que o custo total do terceiro cenário foi maior em função do aumento no número de pátios e na densidade de estradas secundárias, pois embora o custo de trilhas de arraste seja inferior, esta redução não foi suficiente para compensar os aumentos nos demais custos. Pode-se observar também a relação entre os custos de estradas e trilhas, em que, as estradas primárias por serem mais largas requerem maior emprego de mão de obra e máquinas, da mesma forma, as trilhas possuem o menor custo, pois além de possuírem a menor largura, não é realizada a raspagem do solo, assim, demanda menos esforço e tempo de operação.

A Figura 54 apresenta o resultado da melhor solução obtida para a instância 3 na estratégia A e primeiro cenário. A imagem inclui todas as infraestruturas planejadas pelo método, 3.735,16 metros de estradas primárias, 12.177,12 metros de estradas secundárias, 23.092,46 metros de trilhas de arraste primárias, 46 pátios de estocagem e 3.171 árvores exploráveis.

Figura 54. Melhor solução obtida para a Instância 3 na estratégia A e primeiro cenário

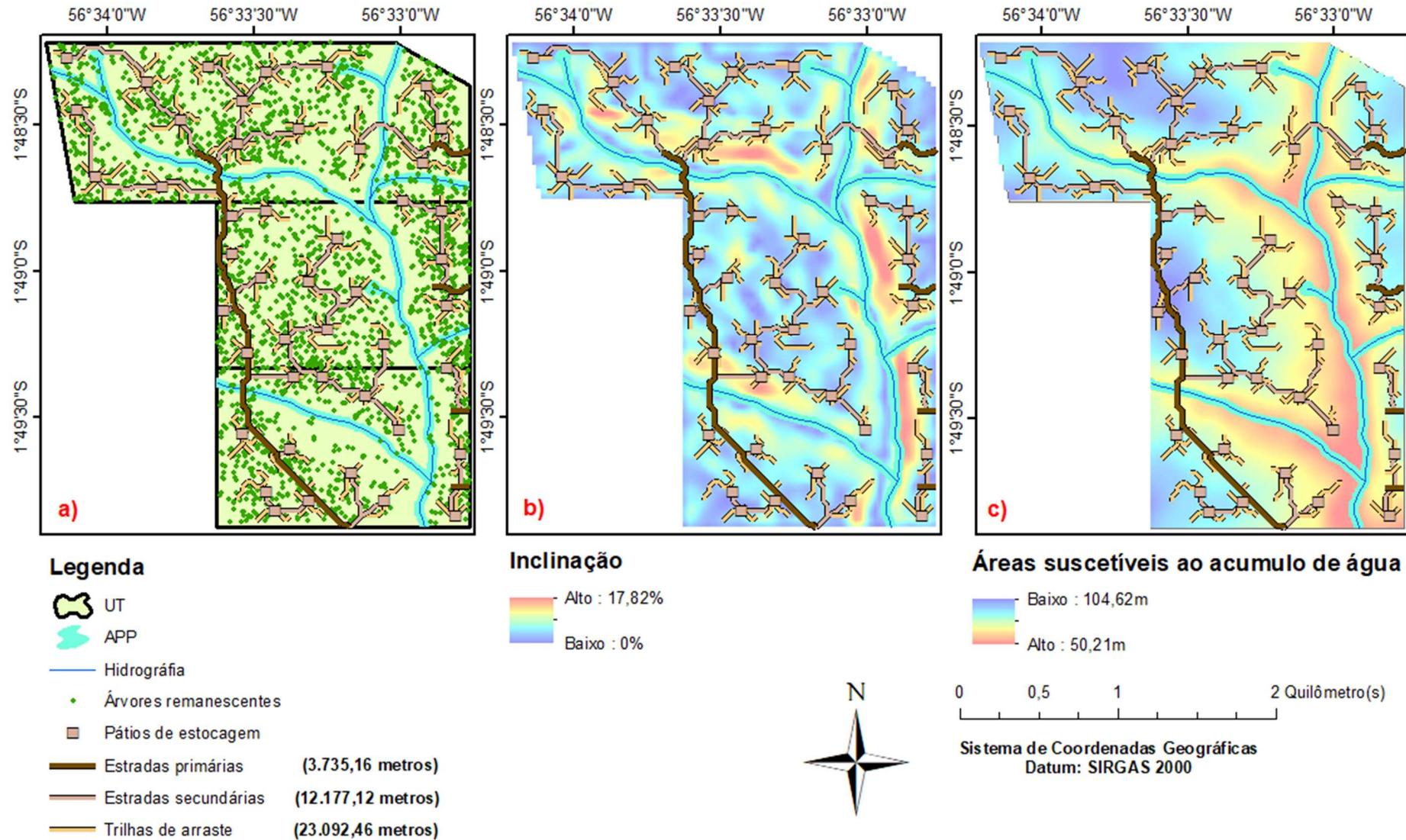


Fonte: O autor.

Pela imagem (Figura 54) pode-se observar que há uma vantagem no planejamento de alocação de infraestruturas combinando duas ou mais UTs, pois observa-se nas extremidades destas, que ocorreu um aproveitamento das infraestruturas, como pátios e estradas. Pode-se observar também que o método foi eficiente em minimizar a travessia de APPs, com apenas 3 ocorrências nos 580,54 ha, condição esta viável para a área avaliada neste estudo, visto que os cursos d'água são transponíveis.

Os desvios de obstáculos, como árvores remanescentes e APPs, o desvio de áreas com inclinação acima do recomendável e o desvio de áreas suscetíveis ao acúmulo de água podem ser visualizados na Figura 55.

Figura 55. Desvios da melhor solução obtida para a Instância 3 na estratégia A e primeiro cenário



Fonte: O autor.

Na Figura 55a pode-se visualizar o desvio de árvores remanescentes, em que claramente observa-se a eficácia do método em realizar os desvios necessários para as estradas e trilhas de arraste. Na Figura 55b foi demonstrado o desvio de áreas de inclinação acima do recomendado. A regra foi aplicada apenas para as estradas primárias e secundárias, uma vez que, não há ocorrência de áreas com inclinação acima de 100%. Da mesma forma, o método foi eficaz em evitar tais áreas.

Por fim, na Figura 55c foi apresentada a relação da solução com os desvios de áreas suscetíveis ao acúmulo de água, que também foi aplicada apenas em estradas primárias e secundárias. E novamente, observa-se que o método, ao alocar as infraestruturas, favoreceu as áreas com risco entre baixo e médio. Naturalmente, há ocorrência de estradas em áreas de risco alto em função da necessidade de atender os pátios de estocagem localizados nessas áreas.

### 6.3.1.2 Resultados computacionais para a estratégia A

A seguir são apresentados os resultados computacionais para estradas primárias, estradas secundárias, trilhas de arraste e pátios de estocagem para a estratégia A. Nos resultados de estradas primárias (Tabela 21), é possível verificar que a FO é maior que a extensão em todos os casos, exceto para o trecho 5 da instância 3. Isso indica que as soluções obtidas violam em algum aspecto as restrições e com isso, a FO foi penalizada. O tempo para a obtenção da solução foi baixo (menor que 1 segundo).

Tabela 21. Resultados obtidos para o traçado de estradas primárias da e estratégia A

Instância	Área (ha)	Trecho	Extensão (m)	Extensão total (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	FO	FO total	Tempo (s)
1	160	1	1.531,81	1.797,01	11,23	1.779,98	2.135,45	0,010
		2	120,31			180,55		
		3	144,89			174,92		
2	328	1	2.462,65	2.992,91	9,12	2.793,34	3.504,16	0,034
		2	120,31			180,55		
		3	144,89			174,92		
		4	265,06			355,36		
3	580,54	1	2.939,93	3.735,16	6,44	3.500,85	4.416,45	0,070
		2	120,31			180,55		
		3	120,03			150,06		
		4	265,06			295,16		
		5	289,83			289,83		

Fonte: O autor.

Em relação aos resultados obtidos para a alocação dos pátios de estocagem (Tabela 22), observa-se que, em geral, os desvios obtidos foram baixos, exceto para

o cenário 3 da instância 3. O desvio baixo indica que o método SA apresentou robustez para este problema e conjunto de dados.

Tabela 22. Resultados computacionais para a alocação de pátios de estocagem em três cenários

Instância	Cenário	Melhor Sol (m)	Média Sol (m)	Desvio (%)	Tempo (minutos)	Tempo médio (minutos)
1	1	108.049,52	109.855,58	1,67	0,22	14,48
	2	173.480,07	173.560,84	0,05	8,22	14,28
	3	94.254,07	95.559,98	1,39	7,48	12,41
2	1	265.459,23	267.461,82	0,75	6,33	15,87
	2	391.604,95	399.573,18	2,03	19,21	14,65
	3	224.182,22	230.585,53	2,86	15,91	17,12
3	1	456.494,36	472.157,97	3,43	27,81	24,92
	2	703.608,54	728.637,06	3,56	12,76	18,70
	3	418.480,28	477.371,47	14,07	21,00	23,42

Nota: - indica 'não reportado'

Fonte: O autor.

Ao analisar os resultados obtidos para estradas secundárias (Tabela 23), observa-se a relação com os resultados de alocação de pátios (Tabela 22), em que, a variação na quantidade de pátios afeta a FO. Com a diminuição de pátios (segundo cenário), ocorreu a redução da extensão total de estradas secundárias. O inverso foi observado ao aumentar o número de pátios (terceiro cenário), a distância até as árvores é reduzida, contudo, há a necessidade de mais estradas para atender tais pátios.

Tabela 23. Resultados computacionais para estradas secundárias da estratégia A

Instância	Cenário	FO pátios	Extensão total (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Densidade Média (m.ha <sup>-1</sup> )	FO estradas secundárias	Tempo Sol (s)
1 (160 ha)	1	109.786,84	2.326,29	14,54	15,24	2.513,65	0,01
	2	173.544,90	1.610,39	10,06	9,92	4.712,63	0,02
	3	95.406,52	3.292,41	20,58	21,82	4.208,80	0,01
2 (328 ha)	1	266.252,97	5.995,46	18,28	17,31	6.665,82	0,05
	2	399.501,22	3.099,76	9,45	10,14	3.129,90	0,02
	3	227.064,64	7.200,23	21,95	22,53	8.229,23	0,03
3 (580,54 ha)	1	467.893,99	12.177,12	20,98	20,76	13.944,50	0,16
	2	765.579,28	7.342,73	12,65	12,74	10.328,95	0,17
	3	530.837,51	14.739,86	25,39	25,95	17.430,51	0,17

Fonte: O autor.

Os resultados para o traçado de trilhas de arraste primárias podem ser observados na Tabela 24. Novamente, o quantitativo de pátios de estocagem afeta a extensão de trilhas. Observe que no segundo cenário, em que o número de pátios é reduzido, a extensão de trilhas de arraste aumenta, pois será necessária uma maior extensão de trilhas para alcançar as árvores exploráveis. Da mesma forma, ao aumentar o número de pátios (terceiro cenário), a extensão de trilhas reduziu. Estes efeitos ocorreram nas três instâncias.

Tabela 24. Resultados computacionais para o traçado de trilhas de arraste da estratégia A

Instância	Cenário	Extensão total (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Densidade Média (m.ha <sup>-1</sup> )	FO total	Tempo Sol (s)
1 (160 ha)	1	5.434,21	33,96	34,38	6.326,81	3,33
	2	5.954,95	37,22	42,04	6.682,92	5,00
	3	3.910,14	24,44	25,57	4.550,08	3,83
2 (328 ha)	1	13.281,75	40,49	42,08	15.482,33	12,33
	2	14.711,11	44,85	46,38	16.356,46	18,00
	3	11.177,45	34,08	34,64	13.222,81	11,05
3 (580,54 ha)	1	23.092,46	39,78	40,83	27.034,51	22,44
	2	26.159,22	45,06	47,62	28.939,96	31,60
	3	18.619,32	32,07	32,47	22.355,74	22,56

Fonte: O autor.

### 6.3.2 Resultados obtidos para a estratégia B

#### 6.3.2.1 Melhor Solução

Um resumo da extensão e densidade da melhor solução para cenário avaliado na estratégia B pode ser visualizado na Tabela 25. O cenário 2 foi o que resultou em menor densidade total para as três instâncias. A diferença para a instância 1 foi menor, uma redução de 3,7% em relação ao cenário 1 e 7,5% em relação ao cenário 2. Para a instância 2, a diferença superou 15% nos dois cenários e para a instância 3, a diferença foi acima de 20% nos dois cenários.

Tabela 25. Resumo da extensão e densidade de estradas e trilhas da Estratégia B

Instância	Infraestrutura	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Extensão (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Extensão (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Extensão (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )
1	Estradas primárias	645,02	4,03	114,91	0,72	1.611,14	10,07
	Estradas secundárias	3.469,67	21,69	3.119,98	19,50	4.194,37	26,21
	Trilhas de arraste	5.434,21	33,96	5.954,95	37,22	4.130,56	25,82
<b>Total</b>		<b>9.548,90</b>	<b>59,68</b>	<b>9.189,83</b>	<b>57,44</b>	<b>9.936,07</b>	<b>62,10</b>
2	Estradas primárias	3.783,99	11,54	2.468,64	7,53	4.792,03	14,61
	Estradas secundárias	7.504,43	22,88	3.379,16	10,30	10.044,07	30,62
	Trilhas de arraste	13.418,37	40,91	15.133,14	46,14	11.724,22	35,74
<b>Total</b>		<b>24.706,79</b>	<b>75,33</b>	<b>20.980,94</b>	<b>63,97</b>	<b>26.560,32</b>	<b>80,98</b>
3	Estradas primárias	7.541,71	12,99	3.208,66	5,53	4.978,81	8,58
	Estradas secundárias	18.829,09	32,43	7.884,27	13,58	26.489,51	45,63
	Trilhas de arraste	23.142,24	39,86	28.489,64	49,07	18.745,73	32,29
<b>Total</b>		<b>49.513,04</b>	<b>85,29</b>	<b>39.582,56</b>	<b>68,18</b>	<b>50.214,05</b>	<b>86,50</b>

Fonte: O autor.

Em relação ao impacto por área aberta, na estratégia B considerou-se os mesmos dados de referência para pátio (Quadro 12) e para a largura da faixa de

estradas (Quadro 14). Novamente, observa-se nos resultados (Tabela 26) que o cenário 2 resultou na menor quantidade de área aberta para as três instâncias, contudo, é o cenário que apresenta maior quantidade de área aberta de trilhas de arraste, o contrário é observado no cenário 3.

Tabela 26. Impacto das infraestruturas em hectares de área aberta para a implantação de infraestruturas na estratégia B

Instância	Cenário	Impacto em área total									
		Pátios de Estocagem		Estradas Primárias		Estradas Secundárias		Trilhas de Arraste		Total	
		ha	% do total	ha	% do total	ha	% do total	ha	% do total	ha	% do total
1 (160 ha)	1	0,7	0,44	0,65	0,40	2,08	1,30	2,45	1,53	5,87	3,67
	2	0,35	0,22	0,11	0,07	1,87	1,17	2,68	1,67	5,02	3,14
	3	1,05	0,66	1,61	1,01	2,52	1,57	1,86	1,16	7,04	4,40
2 (328 ha)	1	1,25	0,38	3,78	1,15	4,50	1,37	6,04	1,84	15,57	4,75
	2	0,65	0,20	2,47	0,75	2,03	0,62	6,81	2,08	11,96	3,65
	3	1,85	0,56	4,79	1,46	6,03	1,84	5,28	1,61	17,94	5,47
3 (580,54 ha)	1	2,3	0,40	7,54	1,30	11,30	1,95	10,41	1,79	31,55	5,44
	2	1,15	0,20	3,21	0,55	4,73	0,81	12,82	2,21	21,91	3,77
	3	3,45	0,59	4,98	0,86	15,89	2,74	8,44	1,45	32,76	5,64

Fonte: O autor.

Ao levar em consideração apenas a área de efetiva exploração (Tabela 27), o total em termos percentuais de área aberta naturalmente aumenta, mas a relação entre os três cenários se mantém.

Tabela 27. Impacto das infraestruturas em percentual de área de efetiva exploração para a implantação de infraestruturas na estratégia B

Instância	Cenário	Impacto em área efetiva de exploração (%)					Total
		Pátios de Estocagem	Estradas primárias	Estradas secundárias	Trilhas de arraste		
1 (144,87 ha)	1	0,48	0,45	1,44	1,69	4,05	
	2	0,24	0,08	1,29	1,85	3,46	
	3	0,72	1,11	1,74	1,28	4,86	
2 (301,32 ha)	1	0,41	1,26	1,49	2,00	5,17	
	2	0,22	0,82	0,67	2,26	3,97	
	3	0,61	1,59	2,00	1,75	5,96	
3 (526,97 ha)	1	0,44	1,43	2,14	1,98	5,99	
	2	0,22	0,61	0,90	2,43	4,16	
	3	0,65	0,94	3,02	1,60	6,22	

Fonte: O autor.

Para estratégia B, os dados de custo são apresentados na Tabela 28, em que, conforme pode-se observar, novamente houve diferença considerável entre os custos dos cenários avaliados. Por exemplo, no cenário 2 da instância 1, os custos totais são 35% inferiores ao cenário 1 e 56% inferiores ao cenário 3.

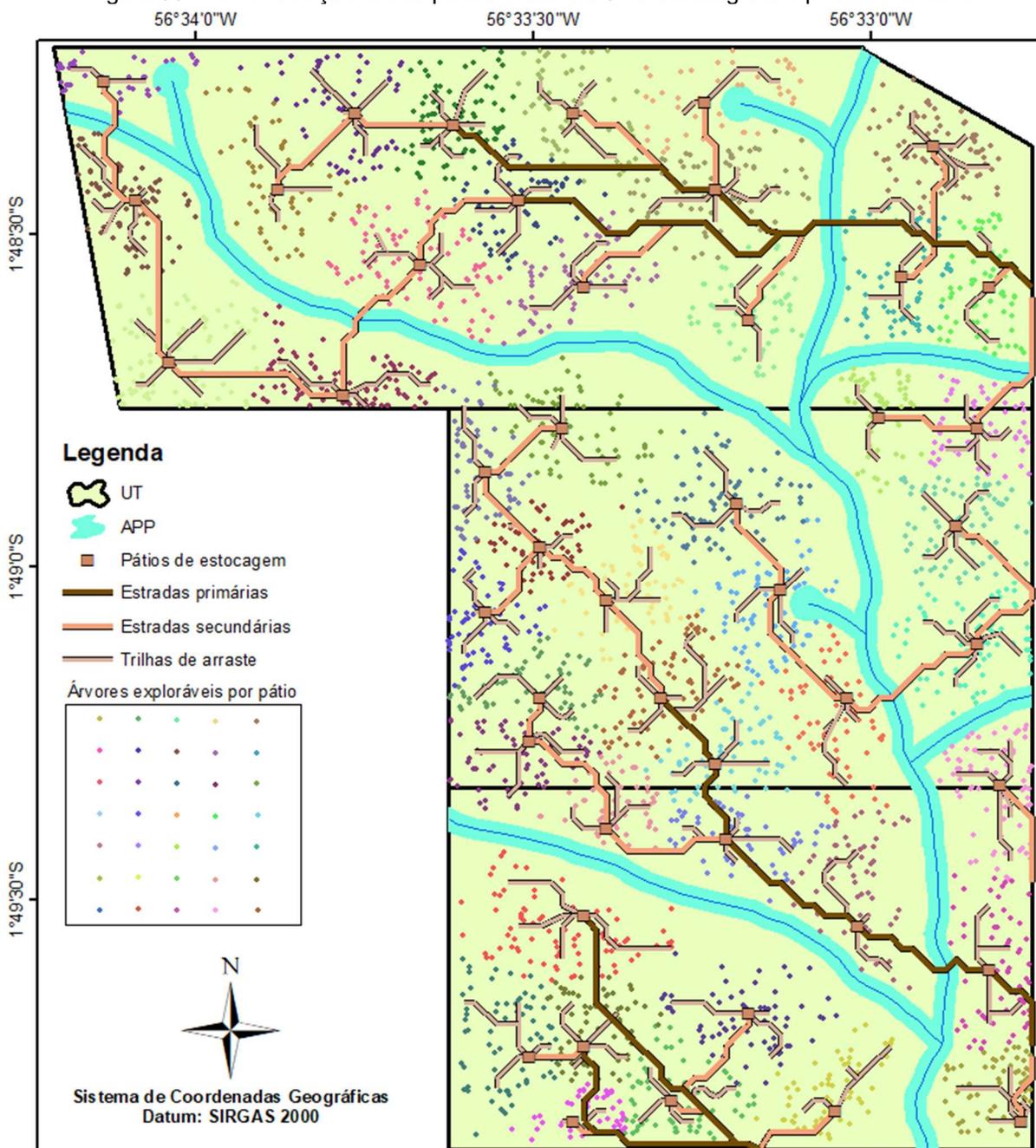
Tabela 28. Custo de construção das infraestruturas de exploração para a estratégia B

Instância	Cenário	Custo de construção de infraestrutura (R\$)				Total
		Pátios de Estocagem	Estradas primárias	Estradas secundárias	Trilhas de arraste	
1	1	4.389,31	1.396,98	3.817,28	787,43	10.391,01
	2	2.194,66	248,86	3.432,55	862,89	6.738,96
	3	6.583,97	3.489,41	4.614,58	598,53	15.286,49
2	1	7.838,05	8.195,35	8.256,26	1.944,37	26.234,04
	2	4.075,79	5.346,56	3.717,70	2.192,84	15.332,89
	3	11.600,32	10.378,55	11.050,34	1.698,88	34.728,08
3	1	14.422,02	16.333,80	20.715,48	3.353,39	54.824,69
	2	7.211,01	6.949,29	8.674,16	4.128,24	26.962,70
	3	21.633,03	10.783,09	29.143,36	2.716,32	64.275,81

Fonte: O autor.

A Figura 56 apresenta o resultado da melhor solução obtida para a instância 3 na estratégia B e no primeiro cenário. A imagem inclui todas as infraestruturas planejadas pelo método, 7.541,71 metros de estradas primárias, 18.829,09 de estradas secundárias, 23.142,24 metros de trilhas de arraste primárias, 46 pátios de estocagem e 3.171 árvores exploráveis.

Figura 56. Melhor solução obtida para a Instância 3 na estratégia B e primeiro cenário



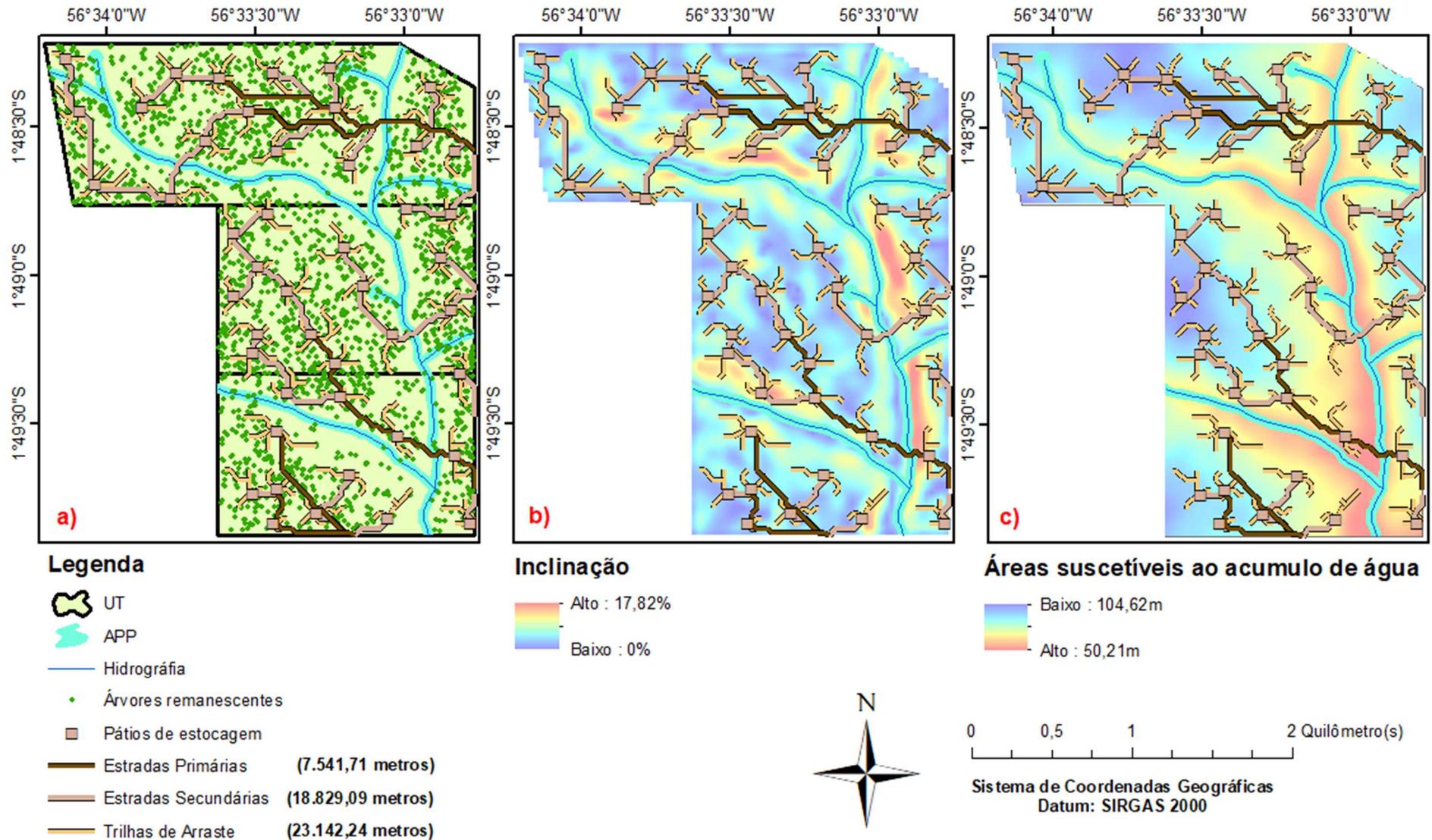
Fonte: O autor.

Pela imagem, similar ao ocorrido na estratégia A, pode-se observar que há uma vantagem no planejamento de alocação de infraestruturas combinando duas ou mais UTs, pois observa-se nas extremidades destas que ocorreu um aproveitamento das infraestruturas, como pátios e estradas. Na estratégia A (Figura 54) o planejamento resultou em 3 travessias de APP, na estratégia B (Figura 56) observa-se um total de 6 travessias de APPs, nos 580,54 ha. Desta forma, a estratégia A foi mais eficaz em evitar as travessias de APP. Novamente, a travessia de APPs é viável para a área avaliada neste estudo, visto que os cursos d'água são transponíveis.

Os desvios de obstáculos, como árvores remanescentes e APPs e o desvio de áreas com inclinação acima do recomendável e áreas suscetíveis ao acúmulo de água podem ser visualizados na Figura 57. Na Figura 57a pode-se visualizar o desvio de árvores remanescentes, em que, similar ao ocorrido na estratégia A, observa-se a eficácia do método em realizar os desvios necessários para as estradas e trilhas de arraste. Na Figura 57b observa-se o desvio de áreas de inclinação acima do recomendado. A regra foi aplicada apenas para as estradas, uma vez que, não há ocorrência de áreas com inclinação acima de 100%. Pela imagem, verifica-se a eficácia do método em evitar tais áreas.

Por fim, na Figura 57c foi apresentada a relação da solução com os desvios de áreas suscetíveis ao acúmulo de água, que também foi aplicada apenas em estradas. E da mesma forma, observa-se que o método, ao alocar as infraestruturas, favoreceu as áreas com risco entre baixo e médio, atingindo áreas de risco alto, apenas diante da necessidade de atender os pátios de estocagem localizados nessas áreas.

Figura 57. Desvios da melhor solução obtida para a Instância 3 na estratégia B e primeiro cenário



Fonte: O autor.

### 6.3.2.2 Resultados computacionais para a estratégia B

A seguir são apresentados os resultados computacionais de estradas e trilhas e arraste da estratégia B. Nos resultados para estradas primárias (Tabela 29), observa-se que os ajustes na quantidade de pátios afetam a densidade das estradas, sendo, ao reduzir o número de pátios (cenário 2), a densidade de estradas primárias também é reduzida. Por outro lado, o aumento no número de pátios (cenário 3), implica no aumento da densidade de estradas, exceto para o cenário 3 da instância 3. Contudo, observa-se também que a FO da alocação dos pátios de estocagem é afetada no sentido inverso, isso indica que o aumento da densidade de estradas acarretará na diminuição da densidade de trilhas de arraste e vice e versa.

Tabela 29. Resultados computacionais para estradas primárias da estratégia B

Instância	Cenário	FO pátios	Extensão total (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Densidade Média (m.ha <sup>-1</sup> )	FO	Tempo Sol (s)
1 (160 ha)	1	109.786,84	645,02	4,03	3,02	729,91	0,01
	2	173.544,90	114,91	0,72	2,27	114,91	0,01
	3	95.824,64	1.611,14	10,07	6,99	3.406,00	0,01
2 (328 ha)	1	269.289,20	3.783,99	11,54	7,08	5.558,04	0,09
	2	405.300,72	2.468,64	7,53	3,55	5.872,55	0,05
	3	228.657,40	4.792,03	14,61	12,27	6.772,82	0,10
3 (580,54 ha)	1	474.860,90	7.541,71	12,99	7,77	9.101,81	0,32
	2	706.083,81	3.208,66	5,53	3,00	5.331,57	0,15
	3	514.437,23	4.978,81	8,58	9,73	5.962,61	0,47

Fonte: O autor.

Para estradas secundárias (Tabela 30), observou-se a relação apresentada para estradas primárias, ou seja, ao reduzir o número de pátios (cenário 2), a densidade de estradas secundárias também é reduzida. Por outro lado, o aumento no número de pátios (cenário 3), incorreu no aumento da densidade. Em geral, o tempo de processamento foi abaixo de 1 segundo para ambos os trechos de estrada. E a extensão do trecho foi afetada em todos os casos pelas restrições, como pode-se verificar no valor da FO.

Tabela 30. Resultados computacionais para estradas secundárias da estratégia B

Instância	Cenário	FO pátios	Extensão total (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Densidade Média (m.ha <sup>-1</sup> )	FO	Tempo Sol (s)
1 (160 ha)	1	109.786,84	3.469,67	21,69	26,71	5.726,78	0,02
	2	173.544,90	3.119,98	19,50	17,49	6.203,89	0,01
	3	95.824,64	4.194,37	26,21	35,52	6.579,54	0,02
2 (328 ha)	1	269.289,20	7.504,43	22,88	36,69	11.724,36	0,10
	2	405.300,72	3.379,16	10,30	21,57	3.529,43	0,06
	3	228.657,40	10.044,07	30,62	44,18	16.932,74	0,13
3 (580,54 ha)	1	474.860,90	18.829,09	32,43	40,94	26.375,68	0,40
	2	706.083,81	7.884,27	13,58	23,08	12.348,58	0,16
	3	514.437,23	26.489,51	45,63	59,80	42.235,87	0,50

Fonte: O autor.

Os resultados para o traçado de trilhas de arraste primárias (Tabela 31) corroboram com o resultado da alocação de pátios, em que, os cenários que consideram o aumento do número de pátios, resultaram em redução da distância até as árvores exploráveis, e conseqüentemente, a redução de trilhas de arraste. Da mesma forma, os cenários em que o número de pátios foi reduzido, resultaram no aumento da distância até as árvores exploráveis e no aumento da densidade de trilhas de arraste.

Tabela 31. Resultados computacionais para o traçado de trilhas de arraste da estratégia B

Instância	Cenário	Extensão total (m)	Densidade (m.ha <sup>-1</sup> )	Densidade Média (m.ha <sup>-1</sup> )	FO total	Tempo Sol (s)
1 (160 ha)	1	5.434,21	33,96	34,38	6.326,81	3,33
	2	5.954,95	37,22	42,04	6.682,92	5,00
	3	4.130,56	25,82	25,57	4.763,19	3,42
2 (328 ha)	1	13.418,37	40,91	42,08	15.401,46	12,89
	2	15.133,14	46,14	46,38	16.731,09	18,78
	3	11.724,22	35,74	34,64	13.769,40	10,95
3 (580,54 ha)	1	23.142,24	39,86	40,83	26.216,10	24,69
	2	28.489,64	49,07	47,62	31.408,45	34,21
	3	18.745,73	32,29	32,47	22.313,98	23,20

Fonte: O autor.

### 6.3.3 Comparativo entre os planejamentos

Para realizar a comparação entre os planejamentos obtidos pelas estratégias A e B, realizou-se um resumo (Tabela 32) considerando os totais consolidados para pátios de estocagem, estradas primárias e secundárias e trilhas de arraste. O primeiro aspecto apresentado é a extensão total, em que, pode-se verificar que apenas nos cenários 1 e 3 da instância 1 a estratégia B superou a estratégia A.

Tabela 32. Comparação entre os planejamentos propostos

Instância	Cenário	Planejamento	Extensão Total (m)	Densidade Total (m.ha <sup>-1</sup> )	Tot. Área Aberta (ha)	Custo Total (R\$)
1	1	Estratégia A	9.557,51	59,73	6,34	11.628,06
		Estratégia B	9.548,90	59,68	5,87	10.391,01
	2	Estratégia A	9.362,35	58,51	5,79	8.721,23
		Estratégia B	9.719,94	60,75	5,02	6.738,96
	3	Estratégia A	8.999,56	56,25	6,58	14.664,77
		Estratégia B	8.969,95	56,06	7,04	15.286,49
2	1	Estratégia A	22.270,12	67,89	13,82	22.840,77
		Estratégia B	24.706,79	75,33	15,57	26.234,04
	2	Estratégia A	20.803,78	63,42	12,12	16.099,81
		Estratégia B	22.296,29	67,98	11,96	15.332,89
	3	Estratégia A	21.370,59	65,15	14,19	27.623,58
		Estratégia B	25.552,28	77,90	17,94	34.728,08
3	1	Estratégia A	39.004,74	67,19	23,73	39.254,87
		Estratégia B	49.513,04	85,29	31,55	54.824,69
	2	Estratégia A	37.237,11	64,15	21,06	27.169,52
		Estratégia B	43.915,62	75,65	21,91	26.962,70
	3	Estratégia A	37.094,34	63,90	24,41	48.637,20
		Estratégia B	52.776,95	90,91	32,76	64.275,81

Fonte: O autor.

Os demais aspectos apresentados (Tabela 32), densidade total, total de área aberta e custo total estão diretamente relacionados ao primeiro aspecto e em função disso, seguiram aproximadamente a mesma tendência, exceto para o aspecto custo total que foi afetado pela diferença nos custos entre estradas primárias, secundárias e trilhas.

#### 6.4 DISCUSSÃO

Os experimentos permitiram observar o quão sensível é a densidade de estradas e trilhas de arraste em relação ao número de pátios de estocagem na exploração em floresta nativa. Em todos os cenários executados para as três instâncias nas duas estratégias, o comportamento ocorreu como esperado. No primeiro cenário adotou-se o número de pátios proposto no planejamento da empresa EBATA Produtos Florestais e no segundo cenário, esse número foi reduzido em 50% e por fim, no terceiro cenário, foi aplicado um aumento de 50%.

Ao passo que a redução de pátios implicou na redução da densidade de estradas, levou ao aumento da densidade de trilhas, como observado nos resultados das duas estratégias executadas (Tabela 17 e Tabela 25, respectivamente). O contrário foi observado no terceiro cenário, ou seja, com o aumento do número de pátios, ocorreu o aumento da densidade de estradas e conseqüentemente a redução da densidade de trilhas de arraste.

As duas metodologias foram eficazes em produzir planejamentos de alocação de infraestruturas, considerando as restrições necessárias de distância máxima de arraste, capacidade de estocagem do pátio, de desvio de árvores remanescentes, de APPs, de áreas com inclinação acima do recomendado e áreas suscetíveis ao acúmulo de água (BRASIL, 2002; PINARD et al., 1995; SIST, 2000). Observou-se também que as estratégias aplicadas em áreas em que se combinou mais de uma UT, foi possível obter um melhor aproveitamento das infraestruturas entre as UTs e uma minimização da transposição de APPs.

As imagens apresentadas do planejamento, Figura 54 e Figura 56 permitem observar a eficácia nas metodologias em alocar as infraestruturas nas áreas de maior densidade de árvores exploráveis. Pode-se verificar também que as trilhas principais foram alocadas de forma a atender todo o conjunto de árvores associadas aos pátios considerando o limite no número de fustes que podem ser arrastados por uma mesma trilha (AMARAL et al., 1998; BRASIL, 2002). Por fim, observa-se que os

pátios de estocagem foram alocados em distância suficiente das APPs para evitar a associação de árvores do outro lado da APP, tendo em vista que o arraste de fuste pela APP é proibido (BRASIL, 2002; PINARD et al., 1995; SIST, 2000).

As imagens do planejamento executado para a área, Figura 55 e Figura 57, permitem observar que para definir o traçado de estradas em área de MFS é necessário tratar as variáveis de desvio com penalização, pois caso contrário, o número de regiões restritas seria grande o suficiente para que soluções viáveis não fossem obtidas. Por exemplo, na Figura 55c pode-se verificar que pátios foram alocados em área com alto risco de acúmulo de água e estes estão rodeados por essas áreas nas proximidades de APPs, de forma que, se a restrição fosse tratada removendo as arestas da área, os pátios nesta localidade não seriam atendidos. Outro exemplo é a transposição de APPs que foi necessária para atender a pátios que não seriam alcançados caso essa restrição fosse tratada com a exclusão das arestas.

Em geral, as variáveis analisadas, extensão, densidade, área aberta e custo, foram inferiores no cenário 2 das duas estratégias avaliadas. Isso indica que o número de pátios alocados influi diretamente nestes fatores e que para este conjunto de dados, um planejamento com o número de pátios inferior, provavelmente trará melhores resultados que o planejamento realizado pela empresa EBATA Produtos Florestais. Além disso, resultados melhores do que os obtidos neste estudo poderiam ser observados com a análise de cenários adicionais. Desta forma, é importante que o tomador de decisão avalie vários cenários de planejamento.

Neste respeito as duas metodologias foram eficientes em obter o planejamento de alocação de infraestruturas em tempo de execução favorável à análise de vários cenários, em torno de 30 minutos para a execução de um cenário. Além disso, é possível ao gestor utilizar essa metodologia para o planejamento em áreas com diferentes tamanhos, como foi demonstrado a aplicação em três instâncias com 160 ha, 328 ha e 580,54 ha, respectivamente.

Por fim, uma comparação entre as duas estratégias (Tabela 32) permitiu observar que em geral a estratégia A obteve melhores resultados que a estratégia B. Por exemplo, dentre os nove cenários avaliados, em apenas dois, a estratégia B resultou em menor densidade de estradas e trilhas. Em média, a estratégia A obteve soluções com densidade de estradas e trilhas 14,2% menor que a estratégia B. Em termos quantitativos de área aberta, a estratégia A obteve, em média, soluções com

10,6% menos área aberta que a estratégia B. Em relação ao custo, a diferença média obtida pela estratégia A foi menor em relação à densidade e a área aberta. Suas soluções possuem custo, em média, 8,6% menor que as soluções da estratégia B.

Contudo, deve-se levar em consideração as vantagens e desvantagens inerentes de cada estratégia. A estratégia B, por exemplo, é mais flexível, pois não requer a fixação dos pontos de início e término de estradas primárias, ficando a cargo do método determinar quando a estrada será primária ou secundária em função do volume de madeira a ser escoada no trecho. Por outro lado, a estratégia A resultou em menor número de transposições de APP em função do *layout* favorável neste aspecto.

## 6.5 CONCLUSÃO

As duas metodologias avaliadas foram eficazes em produzir o planejamento de infraestruturas para a exploração em MFS, pois os resultados obtidos mostraram que as infraestruturas foram alocadas na área considerando os aspectos mínimos necessários a minimização de custos e de danos à floresta remanescente.

Os resultados evidenciam que a localização dos pátios de estocagem exerce influência direta na otimização do arranjo das estradas e trilhas de arraste. Desta forma, conclui-se que é importante que o tomador de decisão, responsável pelo planejamento das infraestruturas, avalie cenários combinando diferentes quantitativos de pátios, para subsidiar sua decisão no planejamento.

Neste sentido, o uso de técnicas computacionais são um forte aliado ao gestor, pois como apresentado neste estudo, o método adequado e empregado de forma correta, pode munir o gestor das informações necessárias em poucas horas e, desta forma, possibilitar que o mesmo utilize o tempo economizado com a análise criteriosa dos cenários produzidos.

Em geral, a estratégia A foi a que apresentou o melhor resultado quantitativo em termos de custo e redução de área aberta. O cenário 2, em que o número de pátios foi reduzido, foi o que resultou em menor custo e menor quantitativo de área aberta para ambas as estratégias. Ambas as estratégias possuem vantagens e desvantagens, desta forma, pode-se considerar que o gestor deve avaliar qual das duas pode ser aplicada com maior eficácia, levando em conta aspectos, como a área, o pacote tecnológico, entre outros.

Por fim, o planejamento integrado das infraestruturas se mostrou eficaz, pois pode-se observar pelas imagens das soluções produzidas pelas duas estratégias, Figura 54 e Figura 56, que houve um aproveitamento das infraestruturas florestais, observado pela alocação dos pátios, estradas e trilhas entre as diferentes UTs presentes na área estudada. Além disso, a tomada de decisão da melhor solução adotada neste estudo, seguiu o critério da soma das FOs das soluções individuais de pátios, estradas e trilhas, pois, observou-se que a escolha pela melhor solução de pátios, por exemplo, não implicaria na melhor solução de estradas e/ou de trilhas de arraste. Mostrando assim a necessidade de integração no planejamento, uma vez que, tomar a decisão com base em variáveis isoladas, provavelmente, não resultará na otimização global da alocação das infraestruturas.

## 6.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAY, A. E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. **Sadhana**, Bangalore, Karnataka, India, v. 31, n. 5, p. 621–633, out. 2006. ISSN 0973-7677. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02715918>>.

AMARAL, P.; VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; VIDAL, E. **Floresta para sempre: um manual para a produção de madeira na amazônia**. Belém, PA: Imazon, 1998. 130 p.

ARIMA, E. Y.; WALKER, R. T.; SALES, M.; JR., C. S.; PERZ, S. G. The fragmentation of space in the amazon basin: Emergent road networks. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 6, p. 699–709, 2008. ISSN 0099-1112. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14358/PERS.74.6.699>>.

BOWMAN, J. K.; HESSLER, R. A. New look at optimum road density for gentle topography. In: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 898. PROC. THIRD INTERNATIONAL LOW-VOLUME ROADS CONFERENCE, 3., 1983, Washington, D.C. **Anais...** Washington, D.C., 1983. P. 30–36. ISSN 0361-1981.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**, Brasília, DF, maio 2012.

BRAZ, E. M. **Otimização da rede de estradas secundárias em projetos de manejo sustentável de floresta tropical**. Rio Branco, AC: Embrapa-CPAF/AC, 1997. 36 p. Circular Técnica, 15.

\_\_\_\_\_. **Planejamento da Exploração em Florestas Naturais**. 1. Ed. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2005. 32 p. ISBN 1517-526X.

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**, v. 37, n. 2, p. 276–292, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/x06-219>>.

EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A.; SAPUNAR, P.; NIETO, E.; SESSIONS, J. B.; SESSIONS, J.; BUSTAMANTE, F.; MUSANTE, H. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. **Operations Research**, v. 54, n. 6, p. 1017–1027, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/opre.1060.0331>>.

EZZATI, S.; NAJAFI, A.; YAGHINI, M.; HASHEMI, A. A.; BETTINGER, P. An optimization model to solve skidding problem in steep slope terrain. **Journal of Forest Economics**, v. 21, n. 4, p. 250–268, 2015. ISSN 1104-6899. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfe.2015.10.001>>.

FFT – FUNDAÇÃO FLORESTA TROPICAL. **Manual de procedimentos técnicos para condução de manejo florestal e exploração de impacto reduzido**. Belém, PA: Fundação Florestal Tropical, 2002. 89 p.

FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal**. 1. Ed. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007. 183 p. ISBN 978-85-99190-04-3.

HAYATI, B. M. E.; ABDI, E. Qualitative evaluation and optimization of forest road network to minimize total costs and environmental impacts. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, n. 3, p. 121–125, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.3832/ifor0610-009>>.

HOLMES, T. P.; BLATE, G. M.; ZWEEDE, J. C.; PEREIRA, R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F.; BAUCH, R. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, n. 1, p. 93–110, mar. 2002. ISSN 0378-1127. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00530-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00530-8)>.

\_\_\_\_\_. **Estradas rurais e florestais**. 1. Ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 441 p. ISBN 978-85-8179-037-4.

MAURI, G. R.; RIBEIRO, G. M.; LORENA, L. A. N.; LAPORTE, G. An adaptive large neighborhood search for the discrete and continuous berth allocation problem. **Computers & Operations Research**, v. 70, p. 140–154, 2016. ISSN 0305-0548. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.002>>.

PICARD, N.; GAZULL, L.; FREYCON, V. Finding optimal routes for harvesting tree access. **International Journal of Forest Engineering**, Taylor & Francis, v. 17, n. 2, p. 35–50, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14942119.2006.10702534>>.

PHILIPPART, J.; SUN, M.; DOUCET, J.-L.; LEJEUNE, P. Mathematical formulation and exact solution for landing location problem in tropical forest selective logging, a case study in southeast Cameroon. **Journal of Forest Economics**, v. 18, n. 2, p. 113–122, 2012. ISSN 1104-6899. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfe.2011.11.002>>.

PINARD, M. A.; PUTZ, F. E.; TAY, J.; SULLIVAN, T. E. Creating timber harvest guidelines for a reduced-impact logging project in malaysia. **Journal of Forestry**, v. 93, n. 10, p. 41–45, 1995.

PORTUGAL, C. R. M.; MACHADO, C. C.; SILVA, E. Construção e conservação de estradas rurais e florestais. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Gestão ambiental e impactos em estradas rurais e florestais**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2013.

RIBEIRO, C. A. A. S.; MARCATTI, G. E.; MUNARETTI, A. M.; SILVA, K. E. da; ALMEIDA, D. R. A. de; VASCONCELOS, R. dos S.; NETO, E. L. V. **Otimização do traçado de trilhas para acesso a recursos florestais naturais**. Manaus, AM: Embrapa Amazônia Ocidental, 2017. 99 p. ISSN 1517-3135.

SESSIONS, J.; BOSTON, K.; WING, M. G.; AKAY, A. E.; THEISEN, P.; HEINRICH, R. **Forest road operations in the tropics**. New York, NY, USA: Springer International Publishing, 2007. 170 p. ISBN 978-3-540-46392-4.

SILVA, E. F. da. **Planejamento da exploração em florestas nativas manejadas da amazônia por meio de pesquisa operacional**. 114 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) — Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, ES, 2019.

SILVA, E. F. da; SILVA, G. F. da; FIGUEIREDO, E. O.; BINOTI, D. H. B.; MENDONÇA, A. R. de; TORRES, C. M. M. E.; PEZZOPANE, J. E. M. Allocation of storage yards in management plans in the Amazon by means of mathematical programming. **Forests**, Basel, Switzerland, v. 9, n. 3, p. 1–20, mar. 2018. ISSN 1999-4907. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f9030127>>.

SILVA, P. H. da; GOMIDE, L. R.; FIGUEIREDO, E. O.; CARVALHO, L. M. T. de; FERRAZ-FILHO, A. C. Optimal selective logging regime and log landing location models: a case study in the Amazon forest. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 48, n. 1, p. 18–27, mar. 2018. ISSN 0044-5967. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201603113>>.

SIST, P. Reduced-impact logging in the tropics: objectives, principles and impacts. **The International Forestry Review**, Commonwealth Forestry Association, v. 2, n. 1, p. 3–10, 2000. ISSN 14655489, 20537778. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/42609931>>.

STERENCZAK, K.; MOSKALIK, T. Use of lidar-based digital terrain model and single tree segmentation data for optimal forest skid trail network. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, n. 5, p. 661–667, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3832/ifor1355-007>>.

SØVDE, N. E.; LØKKETANGEN, A.; TALBOT, B. Applicability of the grasp metaheuristic method in designing machine trail layout. **Forest Science and Technology**, Taylor & Francis, v. 9, n. 4, p. 187–194, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/21580103.2013.839279>>.

WALKER, R.; ARIMA, E.; MESSINA, J.; SOARES-FILHO, B.; PERZ, S.; VERGARA, D.; SALES, M.; PEREIRA, R.; CASTRO, W. Modeling spatial decisions with graph theory: logging roads and forest fragmentation in the brazilian amazon. **Ecological Applications**, v. 23, n. 1, p. 239–254, 2013. ISSN 1051-0761. Disponível em: <<https://doi.org/10.1890/11-1800.1>>.

## 7 CONCLUSÕES GERAIS

A exploração legal de produtos e subprodutos da madeira em florestas nativas na Amazônia exige o emprego de técnicas que objetivam reduzir os danos à floresta remanescente. Dentre os modelos empregados no planejamento das infraestruturas necessárias à exploração, o mais comum é o sistemático, que envolve a definição de estradas retas e separadas de forma equidistante. Da mesma forma, a localização dos pátios é realizada uniformemente ao longo das estradas. Neste modelo, as trilhas de arraste, em geral, não são planejadas.

O modelo sistemático tem se mostrado ineficiente em função da heterogeneidade comum em florestas nativas. Assim, outros modelos têm surgido com o objetivo de minimizar as falhas do modelo sistemático. Este estudo avaliou os vários fatores que devem ser considerados ao realizar o planejamento para o MFS. Na sequência, avaliou-se métodos computacionais para otimizar o planejamento da alocação das infraestruturas de exploração. Os resultados mostraram que heurísticas são eficientes para obter soluções de boa qualidade na localização dos pátios de estocagem e são uma boa alternativa aos métodos exatos que requerem maior tempo de processamento.

Ademais, os resultados indicam também que, para o traçado de estradas e trilhas, algoritmos exatos podem ser empregados de forma eficiente, dada a complexidade do problema. Por fim, duas estratégias de alocação integrada das infraestruturas foram avaliadas. Ambas, combinando técnicas computacionais com o objetivo de minimizar a alocação de infraestruturas atendendo a demanda, mas reduzindo custos e danos à floresta.

Os resultados mostraram que é viável o uso de tecnologias computacionais no apoio do planejamento das infraestruturas. Além disso, o seu uso favorece o trabalho do gestor, lhe dando condição de dedicar maior tempo na tomada de decisão ao invés de trabalhar por semanas para produzir um único planejamento. Além disso, concluiu-se que planejar as infraestruturas de forma integrada, produz melhores resultados, com aproveitamento de pátios, estradas e trilhas entre as UTs, e ainda, permite realizar a escolha pela melhor solução global com base no conjunto das infraestruturas.

Estudos futuros podem considerar a comparação de informações relativas ao planejamento das infraestruturas, obtidas por meio do POA, para avaliar a eficácia

das estratégias em relação ao planejamento tradicional executado por uma empresa do ramo. Outra oportunidade de pesquisa é a seleção de uma área de floresta nativa da Amazônia para a aplicação do planejamento proposto neste estudo e posterior avaliação de sua eficácia.