



**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTRADAS FLORESTAIS EM ÁREAS DE
CONCESSÃO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

PRICILA DO PRADO MORAIS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**





UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA - UnB
FACULDADE DE
TECNOLOGIA - FT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL - EFL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
FLORESTAIS

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTRADAS FLORESTAIS EM ÁREAS DE
CONCESSÃO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Pricila do Prado Moraes
Matrícula: 20/0056158

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Eugenio Yatsuda Arima

**Dissertação de Mestrado em Ciências
Florestais**

Publicação: PPGEFL.
DM-2/2022 Brasília/DF
outubro de 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTRADAS FLORESTAIS EM ÁREAS DE CONCESSÃO
NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

PRICILA DO PRADO MORAIS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS FLORESTAIS.**

APROVADA POR:

**Dr. Álvaro Nogueira de Souza (Departamento de Engenharia Florestal – UnB)
(Orientador)**

Dr. Eugênio Yatsuda Arima (Departamento de Geografia – UT@ Austin) (Coorientador)

**Dr. Reginaldo Sérgio Pereira
(Examinador Interno – PPG CFL - UnB)**

**Dr. Fabiano Emmert
(Examinador externo – UFRA - PA)**

Brasília-DF, 28 de outubro de 2022.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

da do Prado Morais, Pricila
AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTRADAS FLORESTAIS EM ÁREAS DE
CONCESSÃO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA / Pricila do Prado Morais;
orientador Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza ; co
orientador Prof. Dr. Eugenio Yatsuda Arima. -- Brasília,
2022.
62 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) --
Universidade de Brasília, 2022.

1. Amazônia. 2. Manejo florestal sustentável, . 3.
Concessão florestal,. 4. Estradas florestais.. I. Nogueira
de Souza , Prof. Dr. Álvaro , orient. II. Yatsuda Arima,
Prof. Dr. Eugenio , co-orient. III. Título.

Morais, P.P. (2022). Avaliação de modelos de estradas florestais em áreas de concessão na Amazônia Brasileira. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 61p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Pricila do Prado Morais.

TÍTULO: Avaliação de modelos de estradas florestais em áreas de concessão na Amazônia Brasileira.

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Pricila do Prado Morais

Departamento de Engenharia Florestal (EFL)-FT Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF- Brasil

**Dedico
Ao meu futuro marido.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar um destino! Impossível descrever em palavras a bondade e a misericórdia de Deus, grata por tudo que ELE tem feito e ainda vai fazer.

Ao meu pai Ivan, minha mãe Izabel e irmãos Davi, Lucas e Júnior por todo o incentivo, apoio financeiro e diálogo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza por ter acreditado na minha capacidade e ter me ofertado a chance de realizar o mestrado sob sua orientação, pelos conhecimentos e conselhos oferecidos e pelo apoio durante a realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi por me acompanhar desde a época da graduação primeiro com o PIBIC, após com o Trabalho de Conclusão de Curso, e por oferecer todo o suporte durante o Mestrado. Obrigada por sempre estar disponível para ajudar.

Ao Prof. Dr. Eugenio Yatsuda Arima por disponibilizar sua modelagem e pelas contribuições.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Sérgio Pereira por todo o suporte.

Ao Decanato de Pós-Graduação da UnB, ao Departamento de Engenharia Florestal, e a Secretaria de Pós-Graduação pelo apoio a pesquisa e pelos serviços prestados.

Aos demais professores da Pós-Graduação em Ciências Florestais.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

À CEMAL Comércio Ecológico de Madeira - PA, na pessoa do engenheiro florestal Rodrigo Montezano Cardoso por disponibilizar os dados necessários para a pesquisa.

Aos colegas florestais do curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UnB.

À todos os mestres e doutores que me ensinaram tanto em tão pouco tempo.

À todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para que esta etapa fosse concluída.

“O vento que abre o caminho
A rocha que mata minha sede é Você”

(Morada)

“Pois o que o Senhor abençoa, abençoado está para sempre.”

(Autor desconhecido)

“Como é feliz o homem que acha a sabedoria, o homem que obtém entendimento.”

(Provérbios 3:13)

“Crie seu próprio zumbido que as abelhas te seguirão.”

(Autor desconhecido)

RESUMO

A região Amazônica detém alto estoque de recursos florestais madeireiros e não-madeireiros e abrange um terço das florestas tropicais do mundo. Entretanto, esta região está sob constante pressão antrópica, especialmente por desmatamento, distúrbios causados pela extração seletiva de madeira e fogo. O manejo florestal sustentável, que possibilita o aproveitamento dos recursos florestais com baixo impacto na floresta e na biodiversidade é uma alternativa ao desmatamento e para conservação das florestas tropicais. Em anos recentes, o Governo Brasileiro iniciou o processo de concessão de florestas públicas para a implementação do manejo florestal, visando o aproveitamento, a conservação e o uso sustentado dessas florestas na Amazônia. O planejamento e construção da infraestrutura necessária para a exploração da madeira tropical, envolvendo trilhas de arraste, estradas florestais e pátios de estocagem, consistem em desafios para a redução dos impactos florestais na implementação do manejo florestal. No presente estudo, utilizou-se dados de campo e secundários para avaliar o planejamento e a execução da infraestrutura numa área de manejo florestal implementada pela empresa concessionária CEMAL Ltda, na Floresta Nacional de Caxiuanã, no estado do Pará. A área deste estudo foi composta por três Unidades de Produção Anual, totalizando uma área amostral de 5.729,5 ha. Foram desenvolvidas alternativas de planejamento de estradas florestais e trilhas de arraste a partir dos modelos *Tomlin Tobler* e *Spanning Tree*. Foram conduzidas análises comparativas entre as diferentes opções de construção da infraestrutura florestal, comparando com a infraestrutura planejada e executada pela concessionária madeireira. Os resultados desta pesquisa indicaram que a densidade e alocação de estradas florestais e trilhas de arraste obtidas pelo modelo *Tomlin Tobler* apresentaram as melhores respostas para o manejo florestal, considerando os custos envolvidos na operação e os impactos na floresta. A aplicação destes modelos de planejamento de infraestrutura florestal pode contribuir para a mitigação de impactos e a redução dos distúrbios florestais causados pela atividade de extração seletiva de madeira em florestas tropicais, ampliando a sustentabilidade econômica-ecológica do manejo florestal.

Palavras-chave: Amazônia, manejo florestal sustentável, concessão florestal, estradas florestais.

ABSTRACT

The Amazon region holds a high stock of timber and non-timber forest resources and comprises one third of the world's tropical forests. However, this region is under high anthropogenic pressure, especially from deforestation, forest disturbances by selective logging and fire. Sustainable forest management, which enables the use of forest resources causing low forest impacts, is an alternative to deforestation and for the conservation of tropical forests. In recent years, the Brazilian Government has begun the concession of public forests for the implementation of forest management, aiming at the timber extraction, conservation, and sustainable use of those forest resources in the Amazon region. The planning and construction of the necessary infrastructure for the exploitation of tropical wood, involving skid trails, access roads, and log storage patios, are challenges for the reduction of forest disturbances in the implementation of forest management. In this study, field and secondary data were used to assess the planning and execution of infrastructure in a forest management area implemented by a concessionary company CEMAL Ltda, in the National Forest of Caxiuanã, state of Pará. This study area was composed of three Annual Working Units, a total sample area of 5,729.5 ha. Alternatives for planning forest roads and skid trails were developed by applying the Tomlin Tobler and Spanning Tree models, aiming to carry out comparative analyzes between the different construction options of forest infrastructure by comparing with the planned and executed infrastructure by the logging concessionaire. This study results indicated that the density and allocation of forest roads and skid trails generated by the Tomlin Tobler model showed to be the best approach for modeling forest infrastructure by considering the financial costs and environmental impacts in the study area. The application of forest infrastructure planning models can contribute to the mitigation of impacts and the reduction of forest disturbances caused by the activity of selective logging in tropical forests, increasing the economic-ecological sustainability of forest management.

Keywords: Amazon, sustainable forest management, forest concession, forest roads.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Contextualização.....	12
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo geral.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1. Distúrbios nas Florestas Tropicais.....	16
3.2. Manejo Florestal na Amazônia.....	16
3.3. Geoprocessamento aplicado à modelagem de infraestrutura florestal.....	18
3.4. Manejo florestal.....	18
3.5. Estradas florestais.....	21
3.6. Modelagem de Estradas.....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1. Localização e caracterização da área de estudo.....	24
4.2. Dados de campo.....	26
4.3. Modelagem de estradas.....	29
4.4. Avaliação dos modelos.....	32
4.5. Avaliação técnica das operações de exploração florestal.....	32
4.5.1. Distância média de extração (DME).....	32
4.5.2. Custos Operacionais.....	33
4.5.3. Densidade Ótima de Estradas (DOE).....	35
4.5.4. Densidade Aceitável de Estradas.....	36
Separação ótima entre estradas secundárias.....	36
4.5.5.....	36
4.5.6. Avaliação técnica das operações de exploração florestal.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1. Modelagem de estradas com base na localização dos pátios.....	38
5.2. Modelagem de estradas com base na localização das árvores exploradas.....	44
5.2. Determinação da Densidade Ótima de Estradas (DOE).....	46
6. CONCLUSÃO.....	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
8. APÊNDICES.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Áreas das Unidades de Produção Anual (UPA) na área de estudo dentro da Floresta Nacional Caxiuanã, no estado do Pará.	25
Tabela 2 - Dados técnicos arraste.	37
Tabela 3 - Área total de estradas principais e estradas secundárias em cada UPA, quantidade de pontes e área de APP afetadas.	43
Tabela 4 - Comprimento das trilhas de arraste de toras.	46
Tabela 5 - UPA 01, Custos de extração florestal, de estradas, de degradação ambiental, custo total, densidade de estradas, densidade média de estradas e espaçamento entre estradas secundárias para os valores atuais além dos valores ótimos e aceitáveis para cada variável.	47
Tabela 6 - UPA 02, Custos de extração florestal, de estradas, de degradação ambiental, custo total, densidade de estradas, densidade média de estradas e espaçamento entre estradas secundárias para os valores atuais além dos valores ótimos e aceitáveis para cada variável.	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, incluindo três Unidades de Produção Anual (UPA) dentro da área de concessão florestal da empresa CEMAL Ltda, na Floresta Nacional Caxiuanã, no estado do Pará.	26
Figura 3- (a): Estradas florestais na Floresta Nacional de Caxiuanã (FLONA); (b) e (d) toras de madeira retiradas na exploração florestal; (c) profissional retirando toras de madeira em campo. Fotos da exploração dos anos de 2019 e 2020.	29
Figura 5 - Modelagem Tomlin	31
Figura 6 - UPA 01: Estradas Planejadas (estrada principal, estrada secundária e pátios planejados); Estradas Executadas (estrada principal, estrada secundária e executados); Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN) contém estrada principal e estradas secundárias. Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE) contém estrada principal e estradas secundárias.....	39
Figura 7 - Estradas Planejadas (estrada principal, estrada secundária e pátios planejados); Estradas Executadas (estrada principal, estrada secundária e executados); Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN) contém estrada principal e estradas secundárias. Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE) contém estrada principal e estradas secundárias.....	40
Figura 8 - UPA 03: Estradas Planejadas (estrada principal, estrada secundária e pátios planejados); Estradas Executadas (estrada principal, estrada secundária e executados); Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN) contém estrada principal e estradas secundárias. Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE) contém estrada principal e estradas secundárias.....	42
Figura 9 - Modelagem Tomlin com a última iteração; seguida pela penúltima iteração do modelo.	44
Figura 10 - UPA 01: Infraestrutura Executada; Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN); Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE).....	45
Figura 11 - UPA 02: Infraestrutura Executada; Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN); Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE).....	45
Figura 13 - Relação entre a densidade de estradas e os custos de estradas, custos de extração e degradação perda de área produtiva para o corte raso em sistema de árvores inteiras.	50

APÊNDICE

Apêndice 1 - Skidders utilizados pela empresa CEMALL.....	59
Apêndice 2 - Dados fornecidos pela CEMAL.	59
Apêndice 3 - Premissas utilizadas para os cálculos.....	59

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

No Brasil, as mudanças de uso do solo na Amazônia Legal constituem um exemplo importante de escalada de um assunto à agenda política. A Floresta Amazônica caracteriza-se por sua diversidade de ambientes, com mais de 600 tipos diferentes de habitats terrestres e de água doce, que comporta rica biodiversidade: com cerca de 45 mil espécies de plantas e vertebrados classificados (BRASIL, 2013), o que corresponde aproximadamente a $\frac{1}{4}$ dos exemplares terrestres globais (MALHI, 2008). De acordo com o referido autor, a evaporação e a condensação de água na Floresta Amazônica são motores do fluxo atmosférico global, com efeitos nas chuvas ao longo da América do Sul e outros territórios. Cerca de oito trilhões de toneladas de água evaporam por ano, interferindo no fluxo de calor e na circulação atmosférica global (METZ, 2007). Estima-se que na Floresta Amazônica sejam realizados 15% da fotossíntese terrestre global (FIELD, 1998) e que na biomassa ali encontrada contenha 100 bilhões de toneladas de carbono (MALHI, 2008). Tais fatos evidenciam que a manutenção dos serviços ecossistêmicos amazônicos é fundamental (MELLO; ARTAXO, 2017).

Entretanto, a Amazônia brasileira está sob constantes ameaças ambientais pelo desmatamento e pela degradação florestal (MATRICARDI et al., 2020). Como alternativa, o manejo florestal possibilita explorar recursos florestais de forma sustentável (JOHNS; BARRETO; UHL, 1996; PEREIRA et al., 2002; PUTZ et al., 2008; PINARD; PUTZ, 2016; VERISSIMO et al., 1992).

Manejo florestal caracteriza-se por ser um instrumento utilizado por empresas para a exploração dos produtos madeireiros em florestas naturais. O primeiro passo para a exploração da área é a elaboração do Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), que pode ser definido como um plano de uso sustentável da floresta. Nele, são definidas técnicas florestais para exploração dos produtos ou uso dos serviços florestais, por meio do PMFS, também é estabelecido a administração e o gerenciamento das atividades. São elegidas técnicas que causem o mínimo de distúrbios ambientais, além de benefícios para a floresta e para os trabalhadores. A partir de 2006, com o processo de descentralização da gestão florestal, o PMFS é analisado e licenciado pelas OEMAs (Órgãos Estaduais de Meio Ambiente), com exceção das florestas públicas e unidades de conservação federais ou municipais, nos empreendimentos causadores de impacto ambiental nacional ou regional, ou, ainda, em casos de cedência, quando couber. O PMFS baseia-se nas

seguintes fases do manejo florestal: (1ª) Macroplanejamento da exploração florestal; (2ª) Microplanejamento, incluindo as atividades préexploratórias do manejo florestal. (3ª) Atividades de exploração dos recursos florestais, também chamada de Exploração de Impacto Reduzido (EIR); (4ª) Atividades pós-exploratórias, incluindo as operações de silvicultura pós-colheita (ESPADA et al., 2016).

Nas últimas duas décadas, o conjunto de procedimentos para exploração de madeira destinados a mitigar impactos ambientais do corte ficaram conhecidos como técnicas de “exploração de impacto reduzido” (ERI). Apesar de nenhum dos componentes do ERI seja novo, preocupações com práticas destrutivas de exploração madeireira e segurança dos trabalhadores envolvidos estimularam a proliferação de atividades planejadas de pesquisa e treinamento referentes ao manejo florestal sustentável. Estudos no Sudeste Asiático, África e América do Sul e Central comprovaram que impactos indesejados da exploração seletiva podem ser reduzidos ao implantar uma série de práticas por equipes treinadas e supervisionadas (PUTZ et al., 2008).

A extração de madeira convencional (CL) é altamente prejudicial ao dossel florestal, vegetação residual e solo (PEREIRA et al., 2002) e intensifica a suscetibilidade da floresta ao fogo (NEPSTAD et al., 1999) Em contraste, a exploração de impacto reduzido (ERI) destina-se a minimizar a interrupção dos ciclos de carbono e água da floresta tropical (UHL et al., 1997) por meio do planejamento rigoroso, que envolve a seleção de árvores pré-colheita, o corte de cipós, o corte direcional, as trilhas de extração e os pátios de estocagem de toras. O ERI demonstrou reduzir o impacto na vegetação (JOHNS; BARRETO; UHL, 1996; PEREIRA et al., 2002; PINARD; PUTZ, 2016; VERISSIMO et al., 1992). No entanto, os efeitos do ERI nas trocas de gás e energia terra-atmosfera não foram bem quantificados (MILLER et al., 2011)

A construção da infraestrutura florestal tem sido o principal elemento de preocupação ambiental, apresentando um padrão espacial de corte seletivo de madeiras, formada por estradas primárias (principal acesso à área de manejo), estradas secundárias (conexão entre os pátios de estocagem e a estradas principais) e as trilhas de arrastes de toras. Geralmente, esse padrão de infraestrutura florestal pode ser detectado em imagens de satélite, possibilitando o mapeamento da exploração madeireira por sensoriamento remoto (ASNER et al., 2009; MATRICARDI et al., 2010, 2013; PINAGÉ; MATRICARDI, 2015).

Planejar a implantação da infraestrutura florestal mais adequada é uma etapa crucial para a redução dos custos financeiros e dos impactos ambientais causados pela exploração florestal na área de manejo sustentado. O sistema de extração interfere na densidade de estradas, visto que, é ela que determina o posicionamento da malha viária tornando-a otimizada. Por conseguinte, as estradas florestais quando otimizadas acarretam benefícios, econômicos, tecnológicos e ambientais (ZAGONEL et al., 2005). Logo, é indispensável ter noção do ponto ótimo entre o que deve ser construído de estradas e as distâncias do arraste, conforme condições do terreno e estrutura da floresta (BRAZ, 1997).

Realizar o planejamento de uma rede viária para acessar os locais de extração de madeira é uma tarefa complexa e demorada. Ao avaliar rotas alternativas no escritório, dias ou mesmo semanas de tempo de campo podem ser economizados e, por fim, um projeto melhor pode ser desenvolvido (ROGERS, 2001). Assim, técnicas matemáticas que busquem a otimização em termos técnicos e econômicos, como a programação linear, a teoria dos grafos e a heurística, ampliam também a gama de ferramentas que promovem um melhor planejamento (ANDRADE, 2009; CAIXETA-FILHO, 2009; TOMLIN, 1990; WALLIS, 2007).

No presente estudo, foi feita uma análise da infraestrutura planejada e executada numa área de manejo florestal implementado pela empresa CEMAL Ltda, na Floresta Nacional de Caxiuanã, no estado do Pará. Desenvolveu-se alternativas de estradas e trilhas de arrastes usando os modelos *Tomlin* e *Minimum Spanning Tree*, comparando-as às diferentes opções de construção da infraestrutura florestal na área de estudo, avaliando os aspectos econômicos e ambientais. Os resultados desta pesquisa são promissores para apoiar a implementação do manejo em florestas tropicais, apresentando alternativas para reduzir os impactos causados pelas atividades de exploração madeireira, ampliando a sua viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a infraestrutura florestal planejada e executada na área de manejo florestal na Floresta Nacional Caxiuanã, utilizando dados de campo e os modelos *Tomlin* e *Minimum Spanning Tree*. Após aplicar os modelos citados, analisar qual modelo entre as quatro metodologias avaliadas obteve melhor desempenho, e por fim, otimizar o planejamento de estradas florestais.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

1. Desenvolver modelos alternativos para construção das estradas florestais usando os modelos *Tomlin* e *Minimum Spanning Tree*;
2. Comparar o planejamento e a execução da construção de estradas florestais e na área de manejo sustentando e os modelos alternativos quanto a área de abrangência das estradas principais e secundárias;
3. Comparar a infraestrutura planejada, executada e dois modelos alternativos de planejamento de estradas, envolvendo os danos ambientais (número de pontes construídas e área de APP afetada);
4. Analisar o planejamento e a execução das estradas florestais e os dois modelos aplicados quanto a Densidade Ótima e a Densidade Aceitável de estradas além dos custos de estradas, custos de extração, custos de degradação e custos totais.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Distúrbios nas Florestas Tropicais

Quando observada de cima, por meio de imagens de satélite, a floresta Amazônica aparenta ser homogênea, no entanto, o bioma é composto por vários tipos florestais diferentes, tais como: matas de terra firme, florestas úmidas, matas de várzea e zonas de transição entre biomas adjacentes. A partir do ano de 1960, houve um intenso incentivo à ocupação da região Norte do Brasil, conseqüentemente as taxas de desflorestamento e mudanças no uso do solo aumentaram ocasionando a fragmentação da paisagem e queimadas para preparação de áreas agrícolas. Mudanças climáticas observadas nos últimos anos agravam a vulnerabilidade das florestas tropicais por aumentar a temperatura e reduzir a precipitação. Como consequência as florestas se tornam menos densas, menos úmidas e mais propensas a propagação de queimadas (COPERTINO; TERESA; PIEDADE, 2019).

Segundo Rivero (2009), as causas diretas do desmatamento podem ser divididas em três categorias: expansão de pastagens e áreas agrícolas, extração de madeira ilegal e expansão de infraestrutura (mineração, hidroelétrica, rodovias, entre outras). Mudanças no uso do solo são consequência dos processos econômicos que sustentam estas atividades. O crescimento dos mercados para os produtos que provocam as mudanças no uso do solo, associada a urbanização e ao crescimento populacional, além de fatores estruturais, culturais e, finalmente, políticas governamentais, são classificadas como causas subjacentes do desmatamento (RIVERO et al., 2009).

3.2. Manejo Florestal na Amazônia

Um dos principais desafios da Amazônia na área ambiental é a exploração sustentável dos recursos naturais. Os elevados índices de desmatamento na região comprovam a necessidade de múltiplas estratégias para intensificar as políticas de proteção ambiental (RIBEIRO; FONSECA; PEREIRA, 2020). As concessões florestais evidenciam um avanço para a gestão de florestas públicas no Brasil.

Por definição, concessão florestal compreende na delegação onerosa, realizada pelo poder concessor, do direito de praticar manejo florestal sustentável, objetivando a exploração de produtos e serviços florestais, por meio de licitação à pessoa jurídica que atenda as exigências do edital de licitação (BRASIL, 2006). Pode ser reconhecida como instrumento econômico para uso sustentável das florestas (RODRIGUES et al., 2020).

Por meio das concessões é possível promover o uso sustentável das florestas, o aumento da oferta de madeira, melhorias sociais e econômicas através da geração de empregos para a população local. A política ambiental em questão exerce função de proteção das florestas, pois impede o avanço da ocupação desordenada e grilagem de terras, práticas comuns na região norte do país (RODRIGUES et al., 2020). Para melhor entendimento de concessão florestal, primeiramente é necessário apresentar a definição de manejo florestal.

Uma definição de manejo encontra-se na Lei de Gestão de Florestas Públicas (Lei Federal 11.284/06). Neste documento, o termo manejo florestal sustentável é definido como:

administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras, de múltiplos produtos e subprodutos não madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços de natureza florestal;

Manejo florestal sustentado também pode ser classicamente definido como aplicação de métodos e princípios técnicos em uma área florestal. Entre os princípios técnicos destaca-se a silvicultura, que deve ser entendida como segmento da ciência florestal que trata do estabelecimento, condução e colheita de árvores. O conceito aparentemente parece referir-se exclusivamente a floresta plantada, contudo, também pode ser aplicado para florestas naturais (SILVA, 1996).

Por meio das concessões pretende-se que o manejo florestal obedeça a um ciclo, mantendo os serviços ecossistêmicos da floresta e a possibilidade de exploração futura. Para garantir sua eficácia é necessário acompanhar as atividades de exploração em todas as suas etapas. Além de monitorar em campo com a observação de normas específicas a derrubada de árvores, armazenamento e destinação das toras, é necessário também mensurar o impacto na área de manejo. Assim, o monitoramento por satélite pode ser uma ferramenta fundamental (PINAGÉ, 2014).

3.3. Geoprocessamento aplicado à modelagem de infraestrutura florestal

Dentre os dispositivos computacionais utilizadas no planejamento florestal está o Sistema de Informações Geográficas (SIG), sistema que utiliza informações espaciais sobre a localização de alguns atributos da superfície terrestre e permite o gerenciamento de dados para auxiliar na tomada de decisão. No transporte florestal, o GIS é utilizado para gerenciar os dados da malha rodoviária e resolver alguns problemas no transporte, como planejamento de rotas. Com essa finalidade, o pacote de software ArcGis pode ser utilizado para análise de território e cálculo de densidade de estradas. Também pode ser empregado para modelar vários processos e prever o desenvolvimento da situação com base nos resultados obtidos (SILVA et al., 2016).

É essencial mencionar que abordagens fundamentais na definição de distâncias médias de extração ainda são amplamente utilizadas na atualidade, apoiadas em tecnologias GIS (GRIGOLATO; MOLOGNI; CAVALLI, 2017; HALLEUX, 2001) que permitem um planejamento mais detalhado (JOURGHOLAMI; ABDI; CHUNG, 2013) e otimização tanto do primário (extração) quanto do secundário (longa distância) de transporte de madeira (CONTRERAS; CHUNG, 2011; HAYATI; MAJNOUNIAN; ABDI, 2012).

Fortemente ligado ao uso do SIG, o delineamento espacial florestal utiliza técnicas de tomada de decisão, como por exemplo, a simulação, a otimização matemática e a heurística para solucionar problemas espaciais envolvendo o manejo florestal. O planejamento é uma opção aos manejadores na adoção de técnicas para lidar com a fragmentação florestal e os efeitos da exploração. Para realizar o delineamento são incorporados os objetivos em relação a organização espacial no plano de manejo florestal (BETTINGER; SESSIONS, 2003; TOMLIN, 1990).

3.4. Manejo florestal

Apesar do manejo florestal estar previsto na legislação brasileira desde 1965, por meio do art. 15 da Lei 4.771/65, só foi efetivamente regulamentado em 1994 pelo Decreto nº 1.282, de 19 de outubro. Ao citar a legislação brasileira que trata sobre o tema, um dos principais instrumentos é o Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651, de 25 de maio de 2012) que estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal; a exploração florestal, o suprimento de matéria-prima florestal, o controle da origem dos produtos florestais e o controle e prevenção dos

incêndios florestais, e prevê instrumentos econômicos e financeiros para o alcance de seus objetivos. Segundo a Lei a:

exploração de florestas nativas e formações sucessoras, de domínio público ou privado, dependerá de licenciamento pelo órgão competente do Sisnama, mediante aprovação prévia de Plano de Manejo Florestal Sustentável - PMFS que contemple técnicas de condução, exploração, reposição florestal e manejo compatíveis com os variados ecossistemas que a cobertura arbórea forme.

§ 1º O PMFS atenderá os seguintes fundamentos técnicos e científicos:

- I - caracterização dos meios físico e biológico;
- II - determinação do estoque existente;
- III - intensidade de exploração compatível com a capacidade de suporte ambiental da floresta;
- IV - ciclo de corte compatível com o tempo de restabelecimento do volume de produto extraído da floresta;
- V - promoção da regeneração natural da floresta;
- VI - adoção de sistema silvicultural adequado;
- VII - adoção de sistema de exploração adequado;
- VIII - monitoramento do desenvolvimento da floresta remanescente;
- IX - adoção de medidas mitigadoras dos impactos ambientais e sociais.

§ 2º A aprovação do PMFS pelo órgão competente do Sisnama confere ao seu detentor a licença ambiental para a prática do manejo florestal sustentável, não se aplicando outras etapas de licenciamento ambiental.

§ 3º O detentor do PMFS encaminhará relatório anual ao órgão ambiental competente com as informações sobre toda a área de manejo florestal sustentável e a descrição das atividades realizadas.

§ 4º O PMFS será submetido a vistorias técnicas para fiscalizar as operações e atividades desenvolvidas na área de manejo.

§ 7º Compete ao órgão federal de meio ambiente a aprovação de PMFS incidentes em florestas públicas de domínio da União.

A Lei 11.284 de 2006 conhecida como Lei de Gestão de Florestas Públicas instituiu as concessões florestais como instrumento de gestão florestal. A Lei define concessão florestal como:

delegação onerosa, feita pelo poder concedente, do direito de praticar manejo florestal sustentável para exploração de produtos e serviços numa unidade de manejo, mediante licitação, à pessoa jurídica, em consórcio ou não, que atenda às exigências do respectivo edital de licitação e demonstre capacidade para seu desempenho, por sua conta e risco e por prazo determinado;

Atualmente, os planos de manejo florestal são licenciados pelos órgãos ambientais brasileiros que utilizam critérios para minimizar impactos da exploração madeireira na biodiversidade e auxiliar na manutenção de um número mínimo de espécies remanescentes. Cerca de três indivíduos (árvores) dominantes ou codominantes são cortados por hectare (FIGUEIREDO et al., 2018).

A elaboração e autorização de um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) deve seguir fases e requisitos específicos. Primeiro é realizado o zoneamento no qual a área é dividida em áreas exploráveis, áreas de preservação permanente, áreas inacessíveis e pontes/rios/lagos. Após é realizado o inventário florestal, as espécies comerciais são inventariadas, assim como as não-comerciáveis. Então é realizado o planejamento das estradas primárias e secundárias. Divide-se a área em Unidades de Produção Anual (UPA), o conjunto de UPAs é chamado de Unidade de Manejo Florestal (UMF). O órgão ambiental responsável pela concessão emite uma Autorização de Exploração Florestal

(AUTEX). Por fim, ocorre o corte das árvores (ESPADA et al., 2016; PERAZZONI, 2021).

Ao analisar o cenário que envolve o manejo florestal é possível observar que grandes empresas que trabalham com exploração e processamento de madeira são responsáveis por um grande componente da exploração na floresta amazônica e exercem um impacto maior do que operações menores (ARIMA et al., 2005). Apesar de ser um processo de exploração sustentável o manejo florestal também acarreta distúrbios florestais para as regiões exploradas. Para entender todo o processo que envolve a exploração florestal alguns termos precisam ser definidos, tais como concessões florestais e florestas públicas, cujas definições estão descritas abaixo.

Concessão florestal é a modalidade de uso dos recursos florestais na qual o Estado delega a um concessionário o direito de administrar a exploração florestal de uma extensão de floresta de domínio público (PEREIRA; SOBRINHO; FLORES, 2019). Para DIAS (2007), concessão florestal é uma delegação onerosa a uma pessoa jurídica, do direito de praticar manejo florestal sustentável com vista à exploração de produtos e serviços florestais dentro de unidades de manejo previamente delimitadas pelo Poder Público, após a elaboração de Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS).

Por floresta pública entende-se toda floresta, natural ou plantada, desde que situada em domínio público da União, Estados, Distrito Federal ou Municípios. Segundo os princípios enumerados na Lei 11.284/06, a gestão de florestas públicas, apesar de ter como objetivo o desenvolvimento, precisa ser sustentável, respeitando tanto os direitos da população e comunidade local como a preservação do meio ambiente. A exploração em florestas públicas deve priorizar a mão-de-obra regional e possibilitar a pesquisa operacional, adotando práticas de manejo (DIAS, 2007).

3.5. Estradas florestais

As estradas, são as evidências mais visíveis da atividade humana em florestas tropicais e são, portanto, constantemente usadas como indicador para estimar a extensão da degradação florestal. Ainda há carência de dados sobre as evidências e aspectos da fragmentação florestal relacionados à largura de estradas, cobertura florestal desmatada para construção de estradas e sobre como o deslocamento dos animais são afetados. Para o conhecimento sobre os impactos causados na implantação da infraestrutura de exploração florestal, é essencial avaliar as estradas de uso madeireiro não apenas como um componente estático na paisagem, mas considerar todo o seu 'ciclo de vida'. Isso inclui a intensa atividade durante a fase de construção, a principal fase de uso primário

(geralmente extração de madeira), seguida por destinos alternativos (KLEINSCHROTH; HEALEY, 2017)

De acordo com o referido autor, em sua maior parte as estradas florestais não são pavimentadas, contudo, o investimento em sua engenharia baseia-se em uma estrutura de rede com ao menos dois níveis diferentes: (1) estradas primárias para acessar de forma permanente a concessão florestal; (2) estradas secundárias que não possuem saída, são ramificações das estradas principais, utilizadas em um pequeno período de extração (meses ou alguns anos). Finalmente, são construídas trilhas de arraste da área de corte para os pátios onde a madeira ficará estocada. Nos pátios, a madeira é carregada em caminhões, para posteriormente serem transportadas nas estradas principais e secundárias. As trilhas de arraste são pequenas e estreitas próprias para máquinas pesadas como *skidders* ou tratores com guincho adaptado, diferente das estradas florestais construídas para o tráfego de caminhões.

Para Speidel (1966), a implantação de estradas possui as seguintes finalidades: (1) redução das distâncias de extração; (2) possibilitar a orientação e execução do planejamento e como consequência do manejo florestal; (3) favorecer o combate a incêndios florestais; (4) transporte de pessoas, materiais e máquinas; e (5) propiciar o escoamento dos produtos florestais e da produção.

A declividade do terreno restringe o equipamento que será utilizado, o que influencia diretamente na produtividade da máquina selecionada. Para cada equipamento deve ser respeitada a capacidade máxima de trabalho. Em algumas regiões, os danos relacionados as erosões e as dificuldades de regeneração são impedimentos a utilização de alguns equipamentos (ZAGONEL et al., 2005). A densidade de estradas também é um fator influenciado pela declividade do terreno, em regiões de maior inclinação as máquinas tendem a ter dificuldade de locomoção, reduzindo sua produtividade. Em locais com tais características a densidade de estradas necessita ser maior permitindo que a operação seja segura e eficaz (SOUZA, 2016).

3.6. Modelagem de Estradas

A modelagem de estradas é uma adaptação da teoria computacional dos grafos para encontrar árvores geradoras e retilíneas (PRIM, 1957). A teoria dos grafos é um ramo da Matemática Discreta que estuda objetos denominados grafos. O precursor desta teoria é o matemático suíço Leonhard Euler, que formulou e resolveu o problema das pontes de Königsberg. Grafo pode ser definido como uma estrutura contendo um conjunto

de vértices e um conjunto de linhas chamadas arestas, cada aresta é conectada em pelo menos um vértice. Por meio do conceito de pontos interligados por linhas, a representação por grafos facilita a compreensão e resolução de problemas. Deste modo, redes de rotas de transporte (estradas), rotas de distribuição de produtos ou serviços e estrutura organizacional de uma empresa podem ser demonstrados através de grafos (OSTROSKI, 2010).

Também utilizado no delineamento, o Algoritmo de Dijkstra, foi um avanço ao GIS determinante por permitir identificar caminhos de menor custo, sendo essencial para o *software* implementado por Arima et al. (2005) para gerar redes. Dijkstra (1959) demonstra como calcular uma superfície de custo cumulativo de forma eficiente ao analisar a vizinhança ao redor da origem e expandir gradativamente o cálculo até que seja atribuído para todas as células um custo mínimo cumulativo. Quando o menor custo cumulativo da superfície é gerado uma grade de direção para a origem também é gerado, visto que cada célula percorrida foi identificada com o menor custo.

O algoritmo de Dijkstra fornece a rede mínima quando há apenas um destino a ser apontado (ARIMA et al., 2008). Foi utilizado nos dois modelos que foram aplicados neste estudo, por meio dele é possível encontrar o caminho ótimo entre dois pontos. Como nenhum algoritmo retorna o comprimento total mínimo, a rede desenvolve problemas de tamanho moderado, por conseguinte, soluções heurísticas muitas vezes são necessárias (ARIMA et al., 2008).

Encontrar o menor custo cumulativo para movimento de alguma célula de origem arbitrária para todas as células em uma grade pode ser computacionalmente exigente, uma vez que existem muitas combinações de rotas possíveis ligando a origem para as outras células (ARIMA et al., 2008). O algoritmo de construção de estradas procura uma rota da origem ao pátio de extração de madeira de mais fácil acesso, que será conectado pelo caminho de menor custo. Examina a inclinação dos custos em todas as oito direções de uma vizinhança de célula para encontrar o caminho mínimo (COLLISCHONN; PILAR, 2000; YU; LEE; MUNRO-STASIUK, 2003). O segmento formado será o novo conjunto de origem (qualquer ponto no segmento pode servir) para a próxima iteração, o processo é repetido até todos os pátios de extração ou sites estejam vinculados. (ARIMA et al., 2008)). Para implementar o algoritmo desenvolvido por Arima é utilizada uma linguagem de programação chamada Python por meio do software JupyterLab (ver Arima, 2005, Apêndice B para detalhes do código).

Tomlin (1990) foi um dos precursores ao produzir uma solução heurística importante que identifica uma solução de rede para otimização de estradas ao aplicar uma versão do Dijkstra abordando superfície de custo cumulativo e algoritmos de adaptação que utilizam a hidrologia. Eventualmente, os vários caminhos convergem assim como a água converge para os riachos. Caminhos com o maior tráfego de transporte são identificados como estradas, do mesmo modo como caminhos de fluxo acumulado mais alto são denominados como córregos nas aplicações hidrológicas. A modelagem atribui o corte baseado no transporte de volume de toras.

Segundo Emmert (2014), o modelo hidrológico considera que as toras saem de sua posição original, análogas as nascentes, em termos hidrológicos, e seguem para um ponto final, considerado como a foz do rio. A área do manejo florestal é equivalente a área de uma bacia. Para que a madeira seja “escoada” da origem até o ponto final, ela deve tomar os caminhos mais favoráveis ao fluxo, assim como os tributantes de uma bacia.

O Problema da Árvore Geradora Mínima (*Minimum Spanning Tree*) consiste em, a partir de um grafo não orientado, conexo e com pesos em cada aresta, gerar uma árvore que conecte todos os vértices do grafo e que tenha o menor peso total (HERNANDES; SAMPAIO, 2016). Ao abordar a implementação de uma Árvore Geradora, existem critérios que definem o porquê de uma árvore ser preferível a outra, como por exemplo os custos associados a escolha das árvores. Reduzir o custo de construção das topologia da rede é a motivação fundamental de um problema clássico da literatura: encontrar a “Árvore Geradora Mínima” (VIANA, 2016).

Por fim, o caminho ótimo conforme modelagem proposta por Arima (2005) pode ser traçado com destinos determinados e destinos indeterminados. Em casos de destinos indeterminados, as empresas enfrentam problemas como a maximização do lucro que envolve alocação dos fatores de extração e processamento da madeira que são influenciados por restrições financeiras. Outro problema é espacial, com a identificação de caminhos para fornecer o maior volume de madeira (ARIMA et al., 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e caracterização da área de estudo

A área de estudo envolveu uma concessão florestal localizada dentro da Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã, com área total de 317.946,37 hectares, nos municípios de Portel e Melgaço, estado do Pará (Figura 2). A FLONA é classificada como Unidade

de Conservação de Uso Sustentável onde podem ser desenvolvidas atividades antrópicas devidamente aprovadas pelo órgão gestor e de acordo com a criação de cada Unidade, que no caso da Floresta Nacional de Caxiuanã foi criada pelo Decreto Federal nº 239, de 28 de novembro de 1961.

No caso da Flona Caxiuanã, 59% de sua área está inserida no município de Portel e 41% no município de Melgaço (CEMAL, 2017). A área de manejo do presente estudo abrangeu um total de 5.729,5 hectares, dentro da Flona de Caxiuanã, dividida em três Unidades de Produção Anual (UPA) do projeto de manejo florestal aprovado pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB), conforme Tabela 1 e Figura 1.

Tabela 1 - Áreas das Unidades de Produção Anual (UPA) na área de estudo dentro da Floresta Nacional Caxiuanã, no estado do Pará.

UPA	Caxiuanã
01	1.828,5 ha
02	1.951,9 ha
03	1.949,1 ha
Total	5729,5 ha

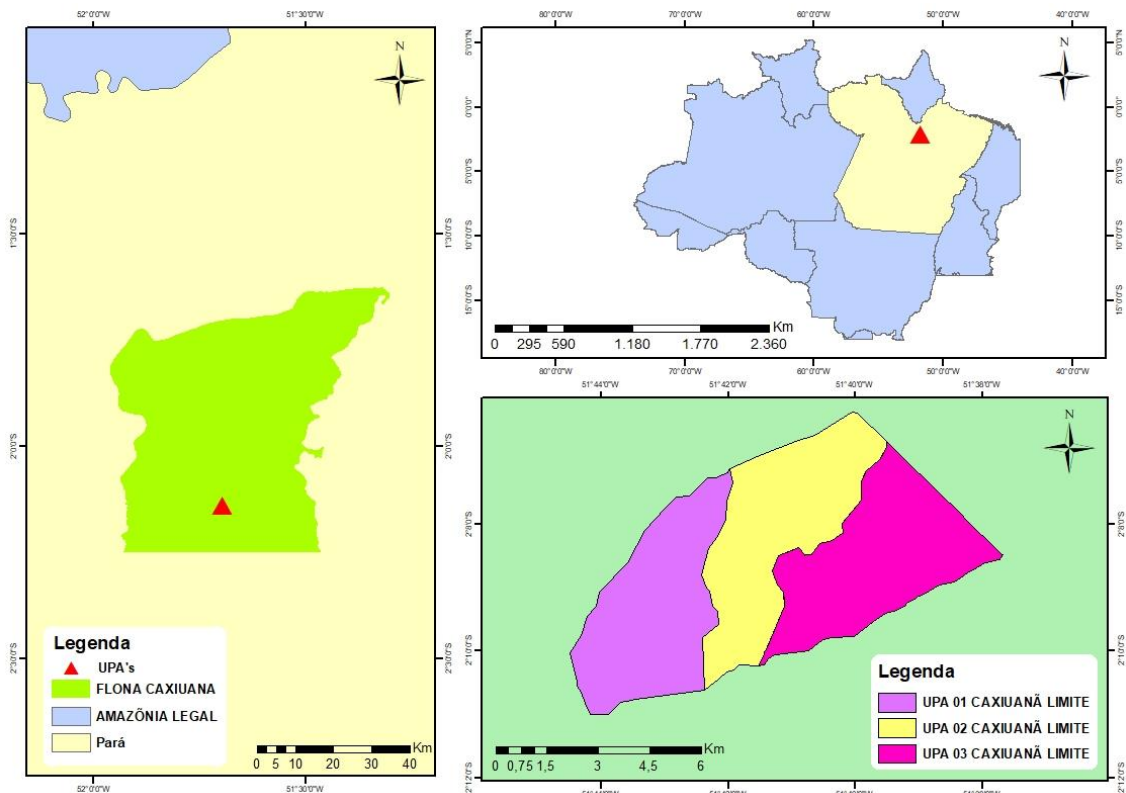


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, incluindo três Unidades de Produção Anual (UPA) dentro da área de concessão florestal da empresa CEMAL Ltda, na Floresta Nacional Caxiuanã, no estado do Pará.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da FLONA de Caxiuanã é do tipo tropical quente e úmido e subtipo climático “Am”, com curta estação seca. A temperatura média do ar é de 26,7°C, com mínima de 22°C e máxima de 32°C. A região da Floresta Amazônica não apresenta estação seca bem definida. Apesar disso, é possível distinguir os períodos secos dos períodos chuvosos. O período chuvoso está compreendido de dezembro a junho, e os meses de agosto a novembro correspondem a estação seca, por conseguinte o mês de julho é o mês de transição entre o final do período chuvoso e início do período seco (OLIVEIRA et al., 2011).

Com base nos mapas dos tipos de vegetação da Amazônia Legal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) foram identificadas três categorias de vegetações primárias na Flona de Caxiuanã, entretanto, a maior parte da Unidade de Conservação possui floresta ombrófila densa de terras baixas (CEMAL, 2017).

4.2. Dados de campo

A empresa CEMAL Ltda é responsável por uma área de concessão florestal para o aproveitamento de madeiras nativas na Floresta Nacional Caxiuanã, no estado do Pará, com o objetivo principal a exploração seletiva de madeiras comerciais em tora. A empresa venceu a licitação da Unidade de Manejo Florestal (UMF III) realizada pelo Serviço Florestal Brasileiro em 2016, iniciando a exploração em 2018, no caso das áreas utilizadas para análise do presente estudo as explorações começaram no ano de 2019/2020. O contrato prevê uma concessão da área por 40 anos, a partir de sua assinatura. Realizou-se o Inventário Censo para cada uma das Unidades de Produção Anual (UPA) utilizadas neste estudo, produzidos pela empresa CEMAL seguindo as diretrizes técnicas e normas oficiais para apresentação e execução do Plano de Manejo Florestal.

A partir do levantamento de campo, a empresa concessionária coletou dados da infraestrutura de exploração florestal na área de estudo. Os dados de campo com a devida localização geográfica obtida com GPS de navegação foram convertidos para o formato vetorial *shapefile*, indentificando: estradas principais e secundárias, limite da UPA,

localização das árvores exploradas, curvas de níveis, Área de Proteção Permanente (APP) e pátios utilizados na exploração madeireira dentro de cada UPA.

É a empresa responsável pela execução do projeto de manejo florestal que define os locais dos pátios para registro, agrupamento e mensuração das toras extraídas da floresta (VERÍSSIMO et al., 1995). Os pátios são interligados por estradas secundárias e principais para possibilitar o transporte das toras da floresta para o desdobramento na indústria madeireira (ARIMA et al., 2008).

Na Figura 2 encontra-se a localização das árvores exploradas, das Áreas de Proteção Permanente (APP) e os pátios de estocagem das toras em cada Unidade de Produção Anual (UPA) localizada dentro da área de estudo.

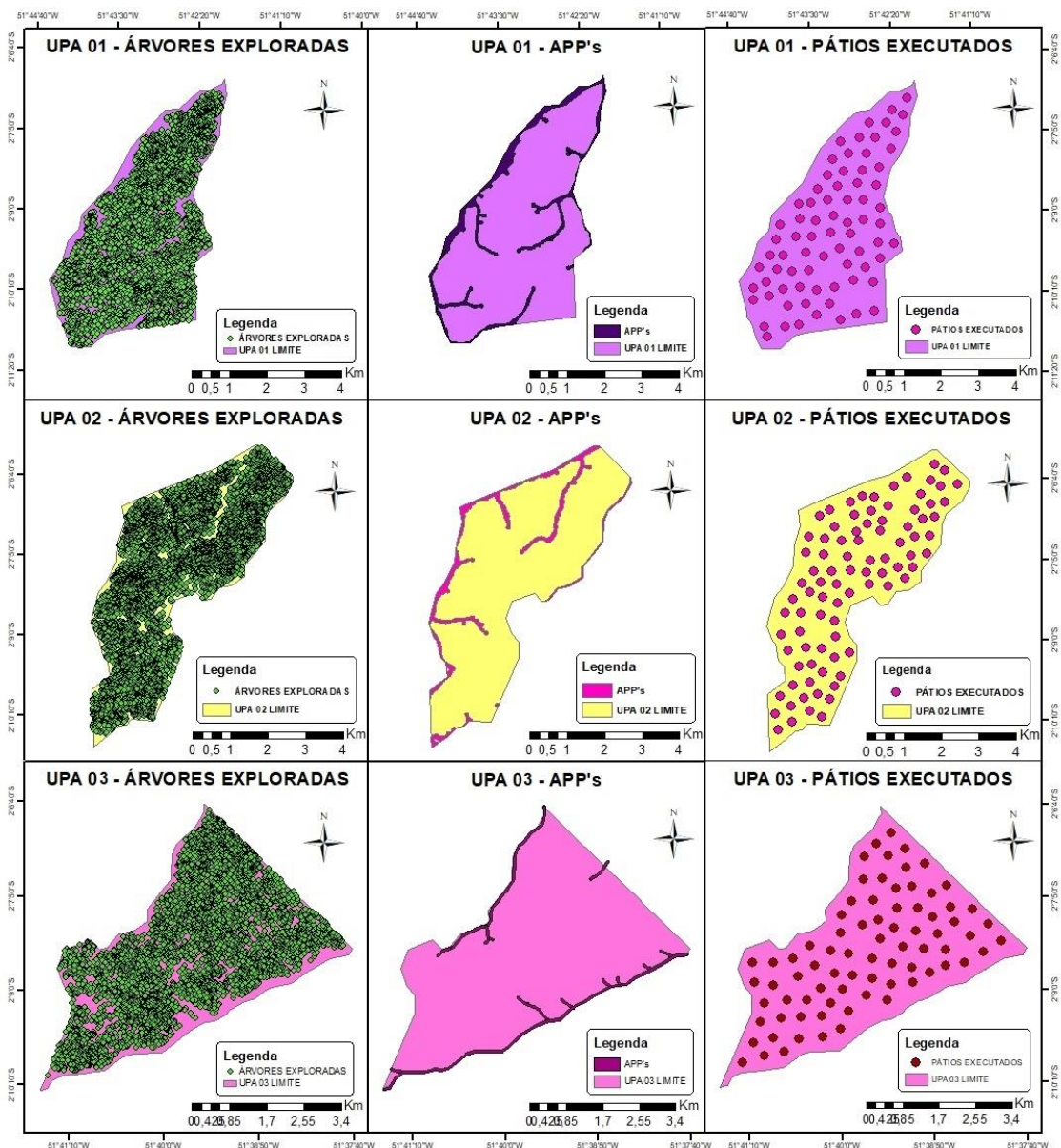


Figura 2 - Mapa de localização das árvores exploradas, das áreas de proteção permanente e dos pátios de estocagem das toras em cada Unidade de Produção Anual na área de estudo.

Em linhas gerais, os critérios utilizados para alocação de estradas e pátios pela empresa responsável pela execução do plano de manejo florestal na área de estudo foram os seguintes: com base nas informações levantadas pelo inventário florestal, após ser definido a posição relativa da área de abrangência de cada pátio (definida por um raio de 250m) essas áreas são distribuídas uniformemente ao longo da região ocupada por árvores com potencial para exploração. Assim, utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) produzido pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e seus subprodutos (relevo e declividade) é proposto o traçado de estradas principais em áreas mais planas ou de aclives suaves e posições mais altas (divisores de águas por exemplo) para interligar os

pátios. Ademais, foram incluídas estradas secundárias para ramificar os acessos aos pátios, priorizando a menor distância e evitando as área de APP. A Figura 3 ilustra as estradas florestais construídas na FLONA de Caxiuanã, toras de madeira exploradas e profissional retirando toras da floresta.



Figura 3- (a): Estradas florestais na Floresta Nacional de Caxiuanã (FLONA); (b) e (d) toras de madeira retiradas na exploração florestal; (c) profissional retirando toras de madeira em campo. Fotos da exploração dos anos de 2019 e 2020.

4.3. Modelagem de estradas

Para a modelagem das estradas foram utilizados os mapas contendo as Áreas de Proteção Permanente, a declividade do terreno derivada do MDE, a localização dos pátios de estocagem de toras e a localização das árvores exploradas pela empresa concessionária do manejo florestal na FLONA Caxiuanã. O modelo aplicado foi desenvolvido por Arima (2005) e busca traçar o caminho (traçado da estrada) ótimo, ou seja, calcular o caminho de menor custo de forma a apresentar mais vantagens (econômicas e ambientais) para a exploração florestal.

A otimização da configuração espacial de estradas é um problema da área de matemática e computação conhecido como teoria computacional dos grafos (PRIM, 1957). Os pátios madeireiros seriam correspondentes aos vértices na teoria dos grafos e os segmentos das estradas às arestas. O objetivo da otimização portanto é conectar os pátios através de uma rede de estradas formados por segmentos de tal forma que os custos totais, segundo uma métrica definida, sejam minimizados. Diversos algoritmos foram desenvolvidos por matemáticos e cientistas da computação ao longo dos séculos para tratar desse problema.

Este problema, conhecido como aparentemente simples é na realidade um dos problemas mais difíceis da matemática e não existe nenhum algoritmo que garanta uma

solução ótima em tempo finito quando o número de vértices é grande. A solução global mínima é conhecida como *Problema de Steiner em Grafos*. Em ciência da computação os problemas são classificados em problemas que são “fáceis de resolver” e problemas que são *NP-problems*. O problema de Steiner faz parte do último caso. Portanto, foram desenvolvidos alguns algoritmos heurísticos, que não garantem a solução mínima global, mas são melhores que a solução obtida com o *Least Cost Path* do ArcGis (Figura 4).

Nas modelagens aplicadas utilizamos o *Least Cost Path Analysis* para calcular os segmentos individuais. Em outros termos, o seguimento de todos os pátios até a origem não foram calculados em uma única iteração. Foram calculados passo a passo (utilizando várias iterações) à medida que a origem é modificada pela incorporação do segmento adicionado na iteração anterior.

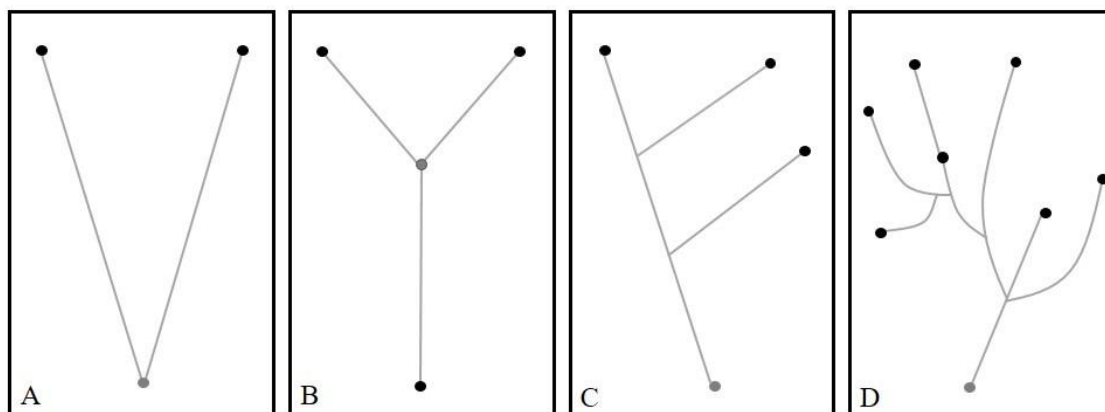


Figura 4 - Diferentes maneiras de ligar pontos: (A) Solução encontrada na maioria dos programas de SIG (*Least Cost Pach*); (B) Global Mínimo; (C) *Minimum Spanning Tree*; e (D) Tomlin.

Foram utilizados dois algoritmos heurísticos nessa dissertação. O primeiro se chama “*Tomlin*” (nome do autor que primeiro propôs esse algoritmo em SIG) e o segundo “*Minimum Spanning Tree*” ou árvore de expansão mínima. A modelagem aplicada *Tomlin* utiliza a função de hidrologia para calcular os segmentos. Como representado na Figura 5, o segmento formado transportará 8 árvores, a partir de então, todo o segmento se transforma em uma nova origem, a próxima vez que o modelo rodar (a próxima iteração) o segmento vai ser diferente, a estrada é construída com os segmentos que possuem maior tráfego. O Modelo 1 funciona apenas quando tem *friction cost* (custo de fricção) bastante variadas.

Segundo ARIMA (2013) regiões íngremes geram mais gastos, o que torna a rede mais tortuosa, por valer a pena desviar de terrenos íngremes.

No presente trabalho foram aplicados dois modelos para o delineamento de estradas, o primeiro modelo utilizado foi o *Tomlin* (Modelo 1) e o segundo *Minimum Spanning Tree* (Modelo 2). No caso do Modelo 1 foi utilizado como *friccion cost* o *Tobler*, para o Modelo 2 foi utilizado o *Dheight*. Além disso, foram explicitamente definidos os destinos para o delineamento. Para o primeiro destino foram utilizados os pátios executados e para o segundo destino foram utilizadas as árvores exploradas.

4.4. Avaliação dos modelos

Os modelos (planejado, executado, e os dois modelos alternativos) foram comparados quanto a área de abrangência de estradas principais e secundárias em metros lineares. Também foram avaliados os possíveis distúrbios ambientais quanto ao número de pontes e área de APP afetada pelas estradas. Finalmente, considerou-se a Densidade Ótima e a Densidade Aceitável de estradas além dos custos de estradas, custos de extração, custos de degradação e custos totais. Com o auxílio do *software* ArcGIS foram calculadas as áreas das estradas de cada modelo, além de ser feita a avaliação de quantas pontes foram construídas e o cálculo da área de APP afetada.

4.5. Avaliação técnica das operações de exploração florestal

4.5.1. Distância média de extração (DME)

Malinovski e Perdocini (1990), descrevem que uma região cortada por estradas paralelas apresentará distância máxima de arraste igual a metade da distância entre estradas, o arraste mais curto equivale a zero, logo, a Distância Média de Arraste (DME) é um quarto da distância entre as duas estradas paralelas. No presente estudo o parâmetro foi calculado para comparar a densidade de estradas em cada modelo avaliado e está associado com a Separação Ótima de Estradas que é o caminho que o *skidder* vai percorrer até o pátio de madeira. Os autores apresentaram a relação entre a densidade de estradas e a distância média de extração, conforme Eq. 01:

$$DME = \frac{2500 * T * V}{DE} \quad \text{Equação 01}$$

Onde: DME = distância média de extração (m); DE = densidade de estradas (m/ha); T = fator de correção para a extração, para casos em que a extração não é feita em linha reta e perpendicular à estrada e não

termina no ponto mais próximo da origem; V = fator de correção para rede de estradas, utilizado quando as estradas são tortuosas e não paralelas, com espaçamento diferente entre elas.

No estudo foi utilizado o fator de correção em 1,85, resultado da relação (Eq. 02):

$$VT = T * V \quad \text{Equação 02}$$

4.5.2. Custos Operacionais

A análise de custos realizada conforme metodologia proposta pela FAO/ECE/KWF segundo (Machado e Malinovski (1988), por meio do método contábil, usando valores estimados e reais baseados nas informações concedidas pela empresa.

Os custos foram classificados como fixos (depreciação, juros, seguros e custo de pessoal operacional), variáveis (combustível, lubrificantes e graxas, material rodante e manutenção) e administrativos.

Para converter os valores de Real para Dólar foi utilizado o valor médio do Dólar em setembro de 2022 do Banco Central do Brasil (BACEN).

4.5.2.1. Custos fixos

Custos que não variam independentemente da quantidade das horas de operação (SOUZA, 2016).

a) Depreciação

O método de cálculo utilizado foi a depreciação linear (Eq. 03), em que:

$$DP = ((Va - Vr) / (Vu * He)) \quad \text{Equação 03}$$

Em que: **DP** = depreciação linear da máquina (R\$/he); **Va** = valor de aquisição da máquina + implemento (R\$); **Vr** = valor residual ou de revenda da máquina + implemento (R\$); **Vu** = vida útil estimada (anos) e; **He** = horas efetivas de uso anual (horas), conforme Eq. 04). No presente estudo, considerou-se $Vr = 20\%$ de Va .

$$He = (Nd * d * Nt * (100 - TD)) / 100 \quad \text{Equação 04}$$

Em que: **He** = horas efetivas de trabalho por ano (horas); **Nd** = número de dias trabalhados por ano; **d** = duração do turno de trabalho (horas); **Nt** = número de turnos de trabalho por dia e; **TD** = demoras e dias improdutivos (%).

b) Juros

Calculados pela aplicação de uma taxa de juros ao investimento médio anual (IMA), que equipara-se ao custo de oportunidade que seria aplicado ao capital (SOUZA, 2016), calculado conforme Eq. 05.

$$IMA = ((Va - Vr) * (N + 1)) / 2 * Vu + Vr \quad \text{Equação 05}$$

Onde: **IMA** = investimento médio anual (R\$); **Va** = valor de aquisição da máquina + implemento (R\$); **Vr** = valor residual ou de revenda da máquina + implemento (R\$) e; **Vu** = vida útil estimada (anos).

Gerado de acordo com a expressão a seguir, considerando uma taxa de juros de 12% a.a, calculado com a Eq. 06.

$$J = \frac{Cc}{2} * \frac{i}{100} \quad \text{Equação 06}$$

Em que: **J** = juros anuais por metro linear de estrada (US\$/m); **Cc** = custo de construção por metro linear de estrada (US\$/m); **i** = taxa anual de juros (%).

c) Seguros

Considerado como o custo que proprietários incorrem em consequência da posse ou uso de sua máquina e dos possíveis prejuízos que são expostas durante o trabalho, o valor foi obtido com a empresa (SOUZA, 2016). Os custos fixos totais (CFT) foram calculados somando a depreciação, os juros e o seguro.

4.1.1.2. Custos Variáveis

a) Combustível

Segundo Santos 2013, os custos com combustível são referentes ao consumo de óleo diesel, calculados conforme a Eq. 07:

$$CC = Pu * C \quad \text{Equação 07}$$

Onde: **CC** = custo com combustível (R\$/he); **Pu** = preço de um litro de óleo diesel (R\$/L) e; **C** = consumo de óleo diesel por hora efetiva (L/he).

b) Óleo hidráulico

Semelhante ao custo de combustível é calculado como: preço x consumo.

c) Óleo motor

Também é calculado da mesma forma que o cálculo do custo de combustível: preço x consumo.

d) Manutenção e Reparos

Divisão do valor de aquisição do skidder em US\$ pela sua vida útil em anos.

e) Pneus

Valor de aquisição de um pneu x número de pneus/vida útil do pneu.

f) Operador Skidder

Salário dos operadores do skidder acrescidos de despesas e encargos sociais.

g) Custo Transporte Pes/Maq

Calculado como 3% do valor dos custos variáveis totais.

4.1.1.3. Custo de Administração

Despesas com trabalhos de escritório e supervisão das operações em campo (foi considerado como percentual de 5% dos custos totais). Representado pela sigla CAD.

4.1.1.4. Custos operacional total

O custo operacional total (COT) foi calculado considerando o somatório de custos fixos, variáveis e administrativo. O custo de produção (cprodução) foi calculado pela divisão do COT pela produtividade de máquina.

4.5.3. Densidade Ótima de Estradas (DOE)

Determinada por meio da derivada das equações dos custos globais, conforme Eq. 08:

$$CG = C_{est} + C_{deg} + C_{est} \quad \text{Equação 08}$$

Onde: **C_{est}** = custo de estradas de uso florestal (US\$/m³); **C_{ext}** = custo de extração florestal (US\$/m³); **C_{deg}** = custo de degradação (US\$/m³).

A densidade ótima de estradas foi definida utilizando fórmulas matemáticas específicas, os valores calculados foram plotados em um gráfico. O gráfico foi construído com 4 curvas: 1) Curva de Custo de Extração; 2) Curva de Custo de Estradas; 3) Curva Custo de Degradação; e 4) Curva de Custo Global Total. Para construir o gráfico utilizou-se a variação da Densidade de Estradas (DE) de 1 a 100.

4.1.1.1. Custo de estradas de uso florestal

Realizado em função da densidade de estradas, utilizando o incremento médio anual de estradas (ZAGONEL et al., 2005). O custo de construção e manutenção de estradas secundárias fornecido pela concessionária foi de US\$ 1.738,00, estimado com a Eq. 09.

$$C_{est} = \frac{CAe}{IMA} * DE \quad \text{Equação 09}$$

Onde: **C_{est}** = custo de estradas (US\$/m³); **CAe** = custo anual de estradas florestais (US\$/m); **IMA** = incremento médio anual (m³/ha); e **DE** = densidade de estradas (m/ha).

4.1.1.2. Custo de extração de madeira

Calculado com base no custo operacional de cada equipamento e na produtividade operacional, empregando a Eq. 10:

$$C_{ext} = \frac{CO}{Pr} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: **C_{ext}** = custo de extração florestal (US\$/m³); **CO** = custo operacional da máquina (US\$/h); **Pr** = produtividade média efetiva da operação (m³/h).

4.1.1.3. Custo de degradação

Calculado conforme fórmula (Eq. 11) a seguir:

$$C_{deg} = fator * DE \quad \text{Equação 11}$$

4.1.1.4. Densidade Ótima de Estradas

A minimização dos custos globais é atendida matematicamente pela derivada do custo global em função da densidade de estradas (ZAGONEL et al., 2005), definida pela Eq. 12.

$$CG = C_{est} + C_{ext} + C_{deg} \quad \text{Equação 12}$$

Onde: **CG** = custo global; **C_{est}** = custo de estradas florestais (US\$/m³); **C_{ext}** = custo de extração florestal (US\$/m³); **C_{deg}** = custo de degradação (US\$/m³).

4.5.4. Densidade Aceitável de Estradas

Para o cálculo da DAE foi utilizado a metodologia apresentada por Malinovski (2013), aplicando um percentual de 5% acima do custo total mínimo, onde os custos de reconstrução e manutenção, extração e perda de área produtiva, também variaram em função do custo total.

4.5.5. Separação ótima entre estradas secundárias

Calcula-se a Separação Ótima entre Estradas Secundárias (SOE) em razão de ser esta distância ótima teórica que permitirá a obtenção de distâncias ideais de arraste para o equipamento de extração, neste caso o *skidder*, com menores custos de uso do equipamento e menores custos de construção de estradas (BRAZ, 1997). O cálculo da SOE pode ser determinado da seguinte forma:

a) Estipulam-se distâncias médias de arraste (DMA), 5 a 10 distâncias, em que o *skidder* possivelmente trabalhará (nas condições do terreno), por exemplo 100, 150, 200, 300 até 1000 m e calcula-se o custo de arraste neste trecho;

b) Mediante a fórmula simplificada $10.000/4 * DMA$, se obtém a correspondente densidade ótima de estradas (DOE, m/ha) para esta distância de arraste. Quanto maior a DMA, sua correspondente DOE fica menor;

c) Identifica-se os custos de extração em relação a distância de arraste (considerando o tipo de equipamento) e o correspondente custo de construção de estradas de acordo com sua metragem por hectare (considerando o padrão ou categoria das estradas). À medida que a distância de arraste aumenta, seus custos sobem. Em contrapartida os custos de construção de estradas começam a cair (as estradas podem estar separadas em categorias: permanentes e temporárias, por exemplo);

d) Somam-se os custos correspondentes (DMA + DOE);

e) Haverá algum ponto intermediário entre 100 m e 1000 m, onde o somatório será o menor de todos. Este será o ponto ótimo. Fora deste ponto poderá se estar construindo estrada a mais (ou a menos) e arrastando a menos (ou a mais), resultando em custos maiores. Como o DMA teórico é igual a $SOE/4$, a distância entre estradas escolhidas será igual ao DMA escolhido, multiplicado por 4.

4.5.6. Avaliação técnica das operações de arraste

Para a operação do arraste realizado de forma mecanizada com o uso do trator florestal *skidder*, foram determinados a produtividade (m^3 hora⁻¹) e os custos operacionais (US\$ hora⁻¹) e de produção (US\$ m⁻³). Os dados empregados (Tabela 2) envolveram informações técnicas e custos fornecidos pela empresa concessionária responsável pela exploração da madeira e com premissas básicas estabelecidas, com base em literatura especializada para determinação de alguns componentes dos custos.

Tabela 2 - Dados técnicos arraste.

Dados Técnicos Arraste		Custos do <i>Skidder</i>	
Toras Extraídas por Dia *	50,00	Valor de Aquisição (US\$) *	386220,00
Volume Médio das Toras (m^3) *	2,5	Valor de Venda (US\$) **	77243,20
Jornada de Trabalho Diária (horas) *	8,00	Vida Útil Estimada (anos) **	25,00
		Consumo Combustível (1 hora ⁻¹) *	14,00
		Preço Diesel (US\$ l ⁻¹)	1,35
		Consumo Óleo Hidráulico (1 hora ⁻¹) **	0,21
		Preço Óleo Hidráulico (US\$ l ⁻¹)	6,76
* Dados Fornecidos Concessionária		Consumo Óleo Motor (1 hora ⁻¹) **	0,13
** Dados de Literatura Especializada		Preço Óleo Motor (US\$ l ⁻¹)	3,28
		Preço de Pneu (US\$/unidade) **	2793,10
		Vida Útil do Pneu (horas)**	2500,00
		Salário Mão-de-Obra (US\$/mês) **	391,60

A empresa concessionária forneceu dados referentes ao valor de aquisição do *skidder* utilizado na operação que foi de US\$ 386220,00 e o preço do diesel de 1,35 US\$ l⁻¹.

¹. Os outros valores da Tabela 2 foram calculados conforme fórmulas citadas anteriormente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelagem de estradas com base na localização dos pátios

As figuras 6, 7 e 8 ilustram as estradas principais, as estradas secundárias e pátios conforme planejado e executado pela empresa concessionário do manejo florestal na Flona Caxiuanã. Do mesmo modo, as duas modelagens utilizadas no presente estudo, a modelagem *Tomlin* e *Minimum Spanning Tree*, ambas contendo estrada principal e estradas secundárias referentes as três UPA's. A área efetivamente ocupada por estradas construídas nas UPAs foi superior ao originalmente planejado pela empresa (Tabela 3). Do mesmo modo, as modelagens teóricas também apresentaram o total de áreas de estradas superiores ao originalmente planejado pela empresa concessionária, usando os pátios executados (efetivamente implantados na área de estudo) como destinos teóricos.

Ao avaliar a UPA 01, conforme Figura 6 e Tabela 3, é possível observar que a área da estrada principal planejada foi de 7,3161 ha, enquanto a área de estrada principal executada foi de 8,1407 ha. Do mesmo modo para a modelagem *Tomlin*, a área delineada foi de 12,0881 ha e para a modelagem *Minimum Spanning Tree* foi de 14,1354 ha, o primeiro modelo obteve melhor resultado quando comparadas as modelagens aplicadas no estudo. Comparando os quatro modelos o que obteve resultados superiores quando avaliado o parâmetro de menor área em relação a construção de infraestrutura relacionada a área de estrada principal, foi o modelo executado pela empresa concessionária.

Considerando a área de estradas secundárias da UPA 01, a área executada pela CEMAL de 25,4088 ha foi menor do que a área planejada pela empresa de 27,4088. Em relação aos dois modelos aplicados o Modelo 1, caso fosse aplicado, abrangeria uma área de 26,6188 ha e o Modelo 2 uma área de 32,1956 ha, demonstrando que o melhor resultado foi alcançado pela modelagem *Tomlin*. Ao avaliar os quatro modelos, a modelagem executada pela empresa apresentou o melhor resultado relacionado a área de estradas secundárias.

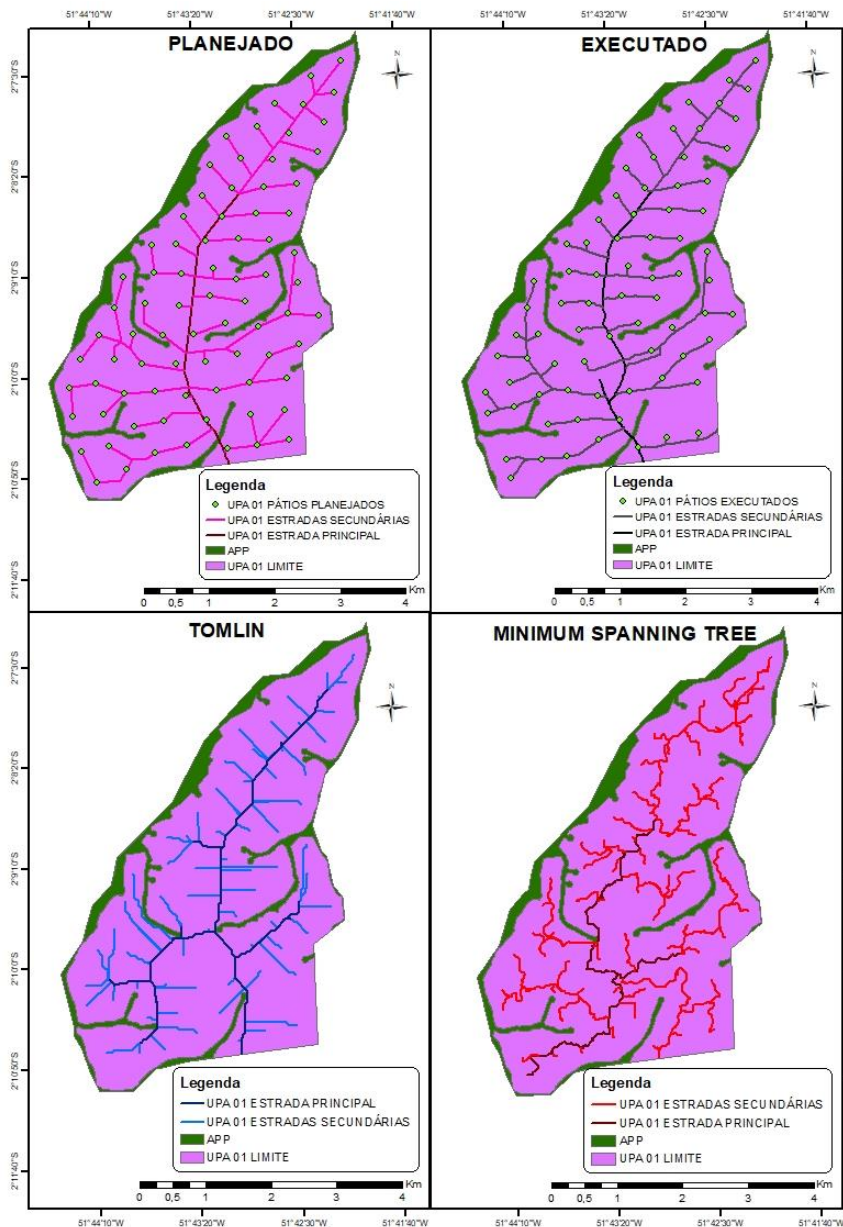


Figura 6 - UPA 01: Estradas Planejadas (estrada principal, estrada secundária e pátios planejados); Estradas Executadas (estrada principal, estrada secundária e executados); Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN) contém estrada principal e estradas secundárias. Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE) contém estrada principal e estradas secundárias.

Considerando a UPA, 02 segundo a Figura 6 e Tabela 3, quanto a área de estrada principal, a área planejada se fosse implantada compreenderia 7,9893 ha, a área efetivamente executada pela CEMAL foi de 8,5402 ha. Para a modelagem *Tomlin* a área calculada seria de 8,7680 ha (valor próximo ao executado pela empresa), a área do *Minimum Spanning Tree* calculada foi de 13,4490 ha. Quando comparado os quatro modelos o planejado pela empresa obteve resultado superior. Ao avaliar os modelos delineados, o Modelo 1 obteve melhor desempenho.

Em relação as estradas secundárias a área do planejamento foi de 30,1115 ha e o que foi executado de 26,4967 ha. Para o Modelo 1 foi de 30,2408 ha e para o Modelo 2 de 39,8863 ha. Ao comparar os quatro modelos avaliados, o executado pela empresa apresentou performance superior, para as modelagens delineadas o Modelo 1 foi melhor avaliado conforme estudo.

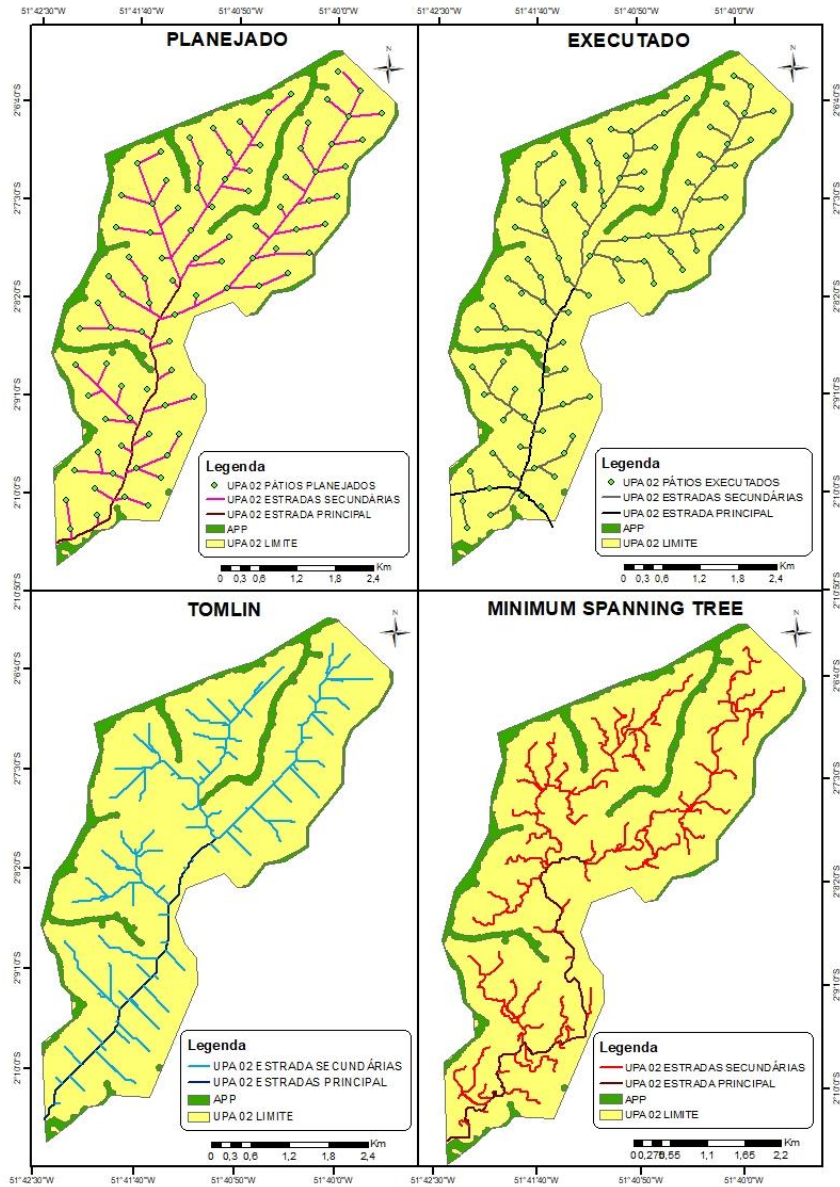


Figura 7 - Estradas Planejadas (estrada principal, estrada secundária e pátios planejados); Estradas Executadas (estrada principal, estrada secundária e executados); Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN) contém estrada principal e estradas secundárias. Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE) contém estrada principal e estradas secundárias.

Para a UPA 03, em relação a área de estradas principais o planejamento englobaria uma área de 6,2181 ha e a infraestrutura executada foi de 6,7741 ha. A área da modelagem 1 seria de 8,9887 ha, para a Modelagem 2 de 15,0444 ha. Ao avaliar os quatro modelos, o planejamento obteve melhor desempenho. Das modelagens aplicadas o *Tomlin* apresentou foi o modelo melhor avaliado.

Em relação as estradas secundárias o planejado e executado apresentaram valores próximos, respectivamente de 29,6038 ha e 29,5163 ha. Em relação aos modelos delineados o Modelo 1 obteve área calculada de 33,2274 ha e o Modelo 2 de 39,8554 ha. Ao comparar os quatro modelos do estudo, o modelo executado obteve desempenho superior e entre as modelagens delineadas o *Tomlin* obteve melhor resultado (conforme Tabela 3 e Figura 8).

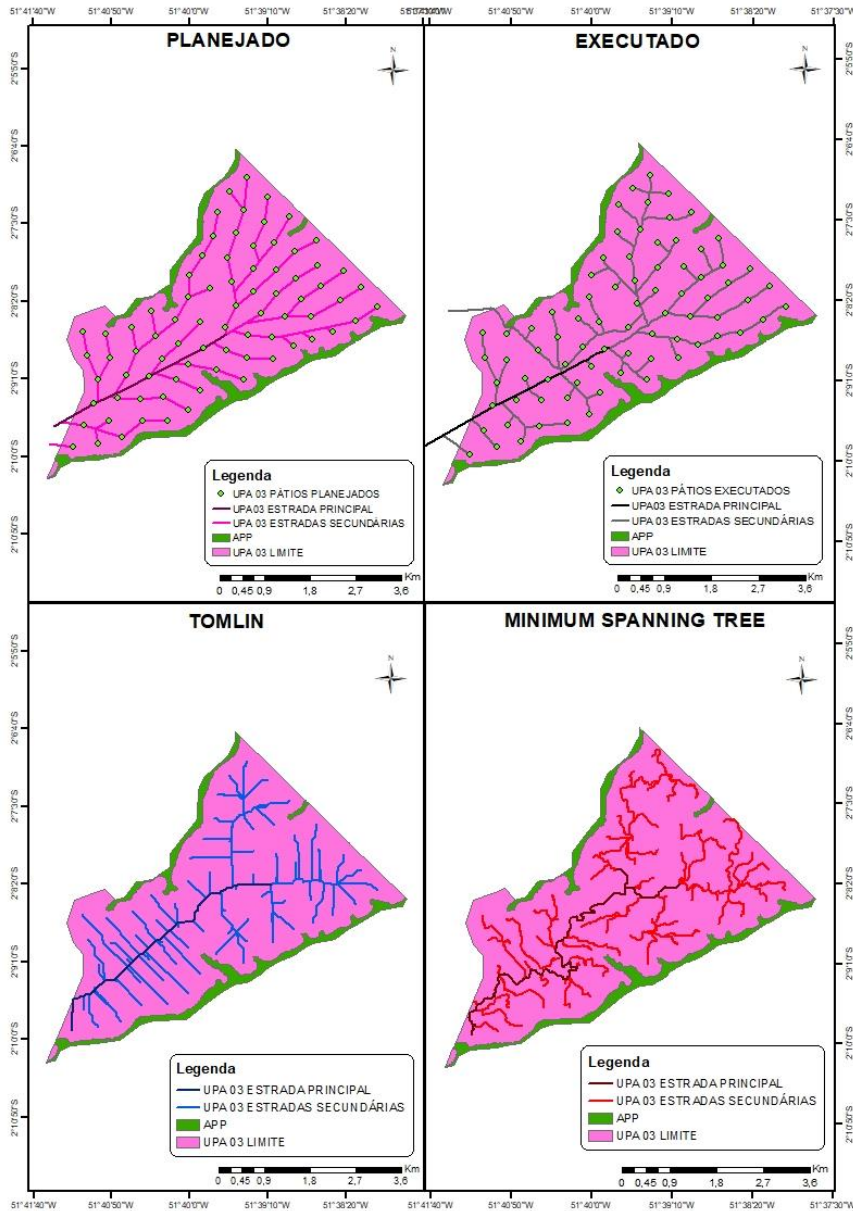


Figura 8 - UPA 03: Estradas Planejadas (estrada principal, estrada secundária e pátios planejados); Estradas Executadas (estrada principal, estrada secundária e executados); Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN) contém estrada principal e estradas secundárias. Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE) contém estrada principal e estradas secundárias.

Na Tabela 3 é possível observar o número de pontes e a área de APP afetada por cada modelo. Foram encontradas uma ponte na UPA 01, no modelo planejado, que foi executada afetando uma área de 0,0992 ha e uma ponte na UPA 02, que foi executada e afetou 0,1523 ha. Nas modelagens aplicadas para a otimização do planejamento de estradas, caso fossem aplicadas, não seria necessário a construção de pontes consequentemente não existiriam áreas de APP afetadas.

Tabela 3 - Área total de estradas principais e estradas secundárias em cada UPA, quantidade de pontes e área de APP afetadas.

UPA'S	Modelos	Área Estradas Principais (ha)	Área Estradas Secundárias (ha)	Pontes	APP (ha)
UPA 01	Planejado	7,3161	27,4088	1	0,1080
	Executado	8,1407	25,4112	1	0,0992
	(Modelo 1) <i>Tomlin</i>	12,0881	26,6188	0	0
	(Modelo 2) <i>Spanning</i>	14,1354	32,1956	0	0
UPA 02	Planejado	7,9893	30,1115	0	0
	Executado	8,5402	26,4967	1	0,1523
	(Modelo 1) <i>Tomlin</i>	8,7680	30,2408	0	0
	(Modelo 2) <i>Spanning</i>	13,4490	39,8863	0	0
UPA 03	Planejado	6,2181	29,6038	0	0
	Executado	6,7741	29,5163	0	0
	(Modelo 1) <i>Tomlin</i>	8,9887	33,2274	0	0
	(Modelo 2) <i>Spanning</i>	15,0444	39,8554	0	0

A modelagem *Tomlin* na última iteração cria segmentos paralelos, que não são considerados ótimos para o delineamento de estradas e em consequência para executar em campo. O modelo não foi desenvolvido para realizar a última iteração, portanto é considerado ideal apenas para modelar estradas principais, no caso das estradas secundárias demonstra não ser muito eficiente.

Quando o algoritmo é implementado, ele grava todas as iterações, na penúltima iteração é possível observar que o modelo ainda não gerou os segmentos paralelos (Figura 9), sendo assim, nem todos os pátios estarão conectados na rede viária. Na obtenção do caminho de menor custo com estradas mais eficientes recomenda-se utilizar uma combinação das duas modelagens propostas. Empregando a última iteração do *Tomlin* como origem para aplicar o modelo *Minimum Spanning Tree*, pois este último evita estradas paralelas.

Por fim, o modelo *Tomlin* pode ser utilizado para planejar o Plano Operacional Anual (POA), segundo Espada (2016) o relatório que deve ser apresentado todo ano pelo engenheiro florestal responsável contendo o planejamento das operações florestais da área que será explorada naquele ano específico. Antes da exploração ser autorizada o POA é analisado pelo órgão ambiental competente. Tanto o PMFS quanto o POA são requisitos legais para a exploração de florestas naturais na Amazônia (Instrução Normativa MMA 05/2006 e Resolução CONAMA 406/2009).

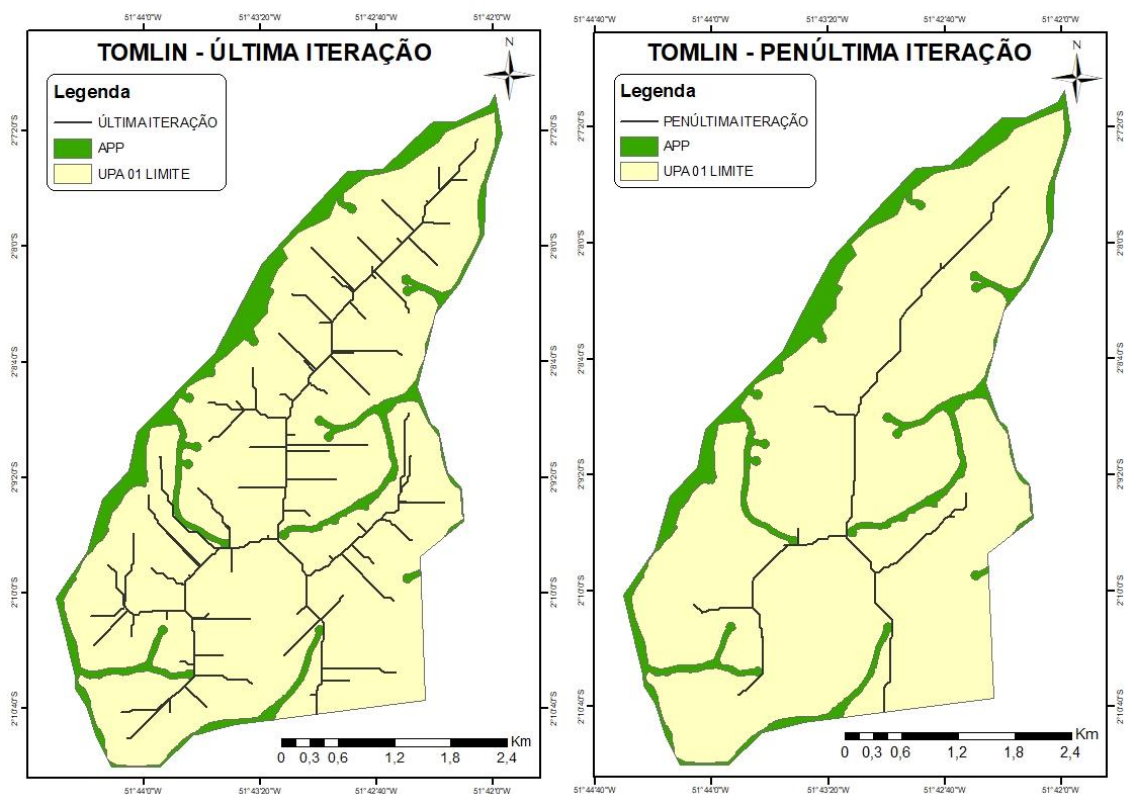


Figura 9 - Modelagem Tomlin com a última iteração; seguida pela penúltima iteração do modelo.

Também é possível a aplicação da modelagem *Tomlin* com o custo *Dheight* e o *Spanning Tree* empregando o custo *Tobler*. No delineamento da modelagem *Minimum Spanning Tree*, com o custo *Dheight*, os resultados obtidos seriam mais próximos aos resultados executados pela empresa concessionária. Todavia, o modelo executado apresenta um custo econômico menor por não desviar das APP's, o que não ocorre nos delineamentos propostos que precisam dar a volta quando encontram células com APP.

5.2. Modelagem de estradas com base na localização das árvores exploradas

Para esta etapa de modelagem das estradas florestais, foram utilizadas as mesmas bases de dados geográficos dos modelos anteriores e como destino final as árvores exploradas pela empresa. A infraestrutura executada (estrada principal, estradas secundárias e trilhas de arraste) e a infraestrutura teórica originada dos modelos 1 e 2 estão apresentadas nas Figura 10, 11 e 12.

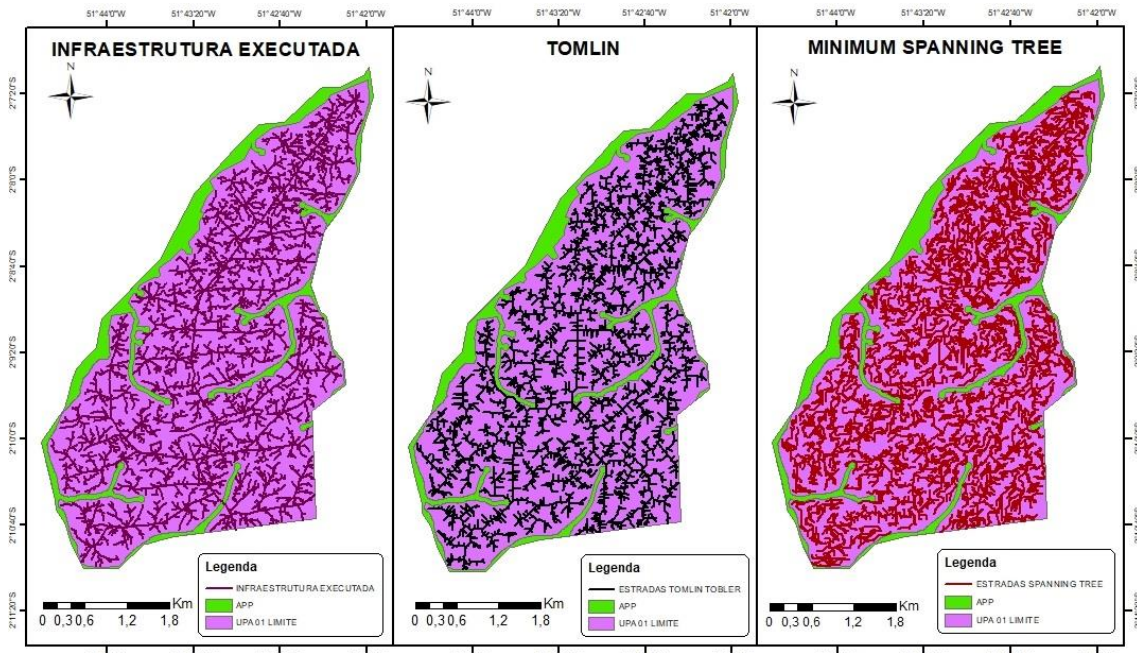


Figura 10 - UPA 01: Infraestrutura Executada; Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (*TOMLIN*); Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (*MINIMUM SPANNING TREE*).

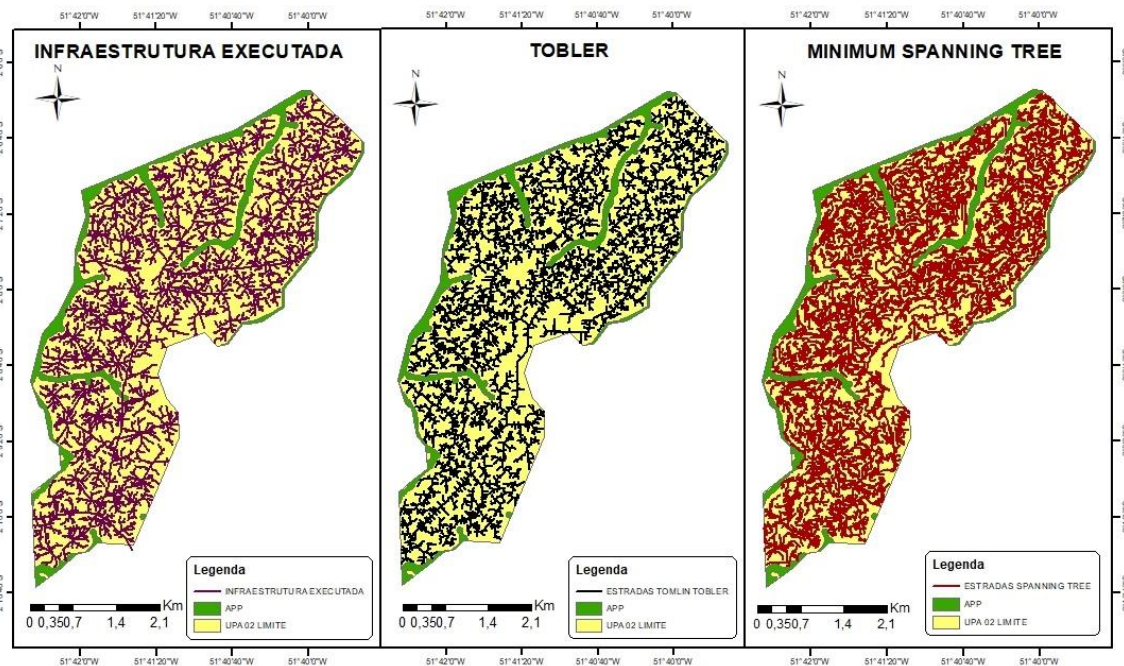


Figura 11 - UPA 02: Infraestrutura Executada; Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (*TOMLIN*); Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (*MINIMUM SPANNING TREE*).

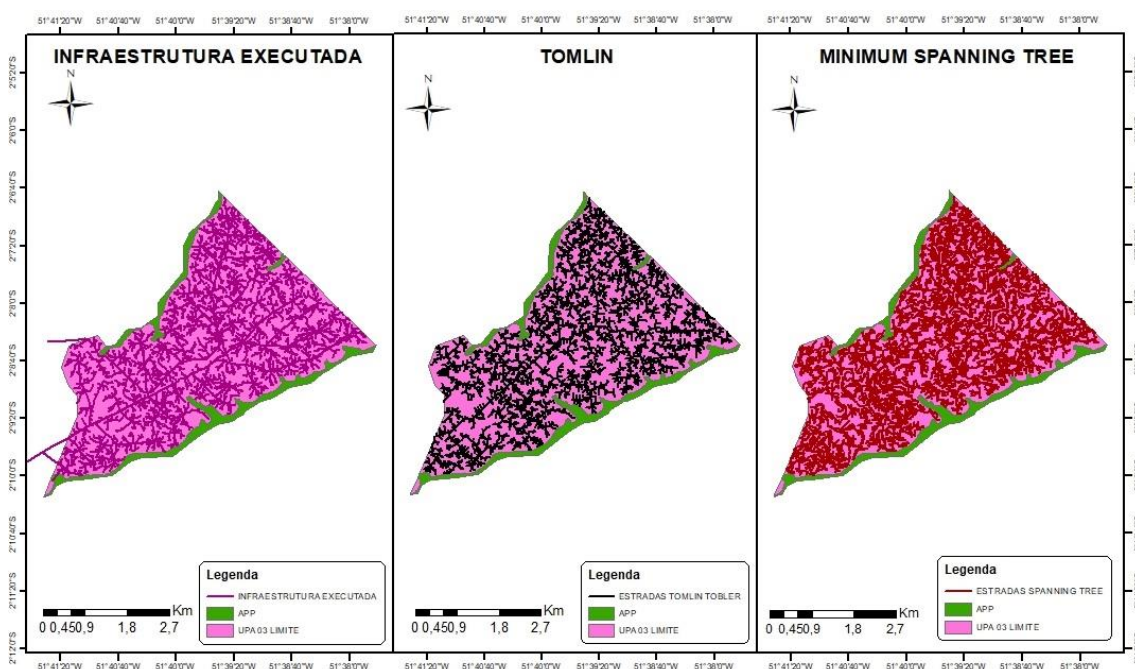


Figura 12 - UPA 03: Infraestrutura Executada; Estradas Delineadas pelo Modelo 1 (TOMLIN); Estradas Modeladas pelo Modelo 2 (MINIMUM SPANNING TREE).

O modelo aplicado *Tomlin* apresentou resultados mais próximos da infraestrutura executada pela empresa concessionária, comparando os perímetros (em metros lineares) das estradas construídas e modeladas. Ver Tabela 4 para mais detalhes.

Tabela 4 - Comprimento das trilhas de arraste de toras.

	Arraste Executado (m)	Arvores Modelo 1 – <i>Tomlin</i> (m)	Arvores Modelo 2 – <i>Spanning Tree</i> (m)
UPA 01	232.640,1	249.376,7	431.715,2
UPA 02	286.268,0	324.140,0	564.977,3
UPA 03	266.895,6	283.017,1	498.923,0

5.3. Determinação da Densidade Ótima de Estradas (DOE)

Os custos atuais, ótimo e aceitável da Densidade de Estradas (DE) estão descritos na tabela 5, 6 e 7. Comparando a densidade de estradas na UPA 01, a infraestrutura executada apresentou melhor resultado com 17,48 m ha⁻¹, entre os modelos, a modelagem *Tomlin* obteve resultado de 18,47 m ha⁻¹, valor próximo ao valor calculado como aceitável de 18,41 m ha⁻¹. Quanto menor a densidade de estradas menos áreas de infraestrutura em consequência menos impacto ambiental vai incidir sobre a floresta.

O Espaçamento Aceitável de Estradas (DAE) e a Densidade Ótima de Estradas (DOE) são relacionados com a Densidade de Estradas (DE). Quanto mais espaçado

estiver uma estrada da outra significa que a rede de estradas é menor, o que aumenta o custo de extração, contudo, diminui o custo de degradação ambiental e o custo de construção e manutenção de estradas. O ideal é o espaçamento da DOE e DAE (que foram calculados conforme fórmulas apresentadas anteriormente) os modelos que chegam próximos aos valores deles, ou que são inferiores, são os espaçamentos mais adequados. Deste modo, o espaçamento de todos os modelos avaliados neste trabalho para a UPA 01, foram considerados ótimos ou aceitáveis.

Tabela 5 - UPA 01, Custos de extração florestal, de estradas, de degradação ambiental, custo total, densidade de estradas, densidade média de estradas e espaçamento entre estradas secundárias para os valores atuais além dos valores ótimos e aceitáveis para cada variável.

CENÁRIO	PARÂMETROS AVALIADOS						
	Cext	Cest	Cdeg	CTot	DE	DME	EE
	US\$ m ⁻³			m ha ⁻¹			
Planejado	8,33	4,48	1,40	14,21	18,83	248,94	573,15
Executado	8,52	4,16	1,30	13,98	17,48	268,16	607,03
<i>Tomlin</i>	8,38	4,40	1,37	14,15	18,47	253,79	589,41
<i>Spanning</i>	7,93	5,36	1,67	14,97	22,51	208,24	589,41
Ótima	9,68	2,89	0,90	13,47	12,11	386,98	825,37
Aceitável	8,39	4,38	1,37	14,14	18,41	254,62	543,18

Legenda: Cext: Custo de extração; Cest: Custo de estradas; Cdeg: Custo de degradação; CTot: Custo total; DE: Densidade de estradas; DME: Distância média de extração; EE: Espaçamento entre estradas; Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Para a UPA 02, a DE que apresentou melhor resultado foi de infraestrutura executada com 17,05 m ha⁻¹, valor próximo ao valor aceitável de 18,41 m ha⁻¹. Quando comparadas as modelagens aplicadas no presente estudo, a DE da modelagem *Tomlin* com 19,51 m ha⁻¹ apresentou melhor desempenho quando comparada com a modelagem *Minimum Spanning Tree* com DE no valor de 26,03 m ha⁻¹. O espaçamento de todos os modelos avaliados neste trabalho para a UPA 02, foram considerados ótimos ou aceitáveis.

Tabela 6 - UPA 02, Custos de extração florestal, de estradas, de degradação ambiental, custo total, densidade de estradas, densidade média de estradas e espaçamento entre estradas secundárias para os valores atuais além dos valores ótimos e aceitáveis para cada variável.

CENÁRIO	PARÂMETROS AVALIADOS						
	CExt	CEst	CDeg	CTot	DE	DME	EE
	US\$ m ⁻³			m ha ⁻¹			

Planejado	8,27	4,61	1,44	14,32	19,36	242,12	569,21
Executado	8,59	4,06	1,27	13,91	17,05	274,93	589,41
<i>Tomlin</i>	8,25	4,65	1,45	14,34	19,51	240,26	597,75
<i>Spanning</i>	7,66	6,20	1,93	15,79	26,03	180,08	597,75
Ótima	9,68	2,89	0,90	13,47	12,11	386,98	825,37
Aceitável	8,39	4,38	1,37	14,14	18,41	254,62	543,18

Legenda: Cext: Custo de extração; Cest: Custo de estradas; Cdeg: Custo de degradação; CTot: Custo total; DE: Densidade de estradas; DME: Distância média de extração; EE: Espaçamento entre estradas; Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A partir dos valores do DE calculados para a UPA 03, observou-se que o valor da infraestrutura executada foi o que chegou mais próximo ao valor do DAE, entre os modelos aplicados, o *Tomlin* apresentou melhor desempenho. Dentre os modelos avaliados, os valores de EE do planejado ficou mais próximo ao DOE e ao DAE. Dos modelos aplicados o *Minimum Spanning Tree* e o *Tomlin* apresentaram valores iguais (960,5 m).

Tabela 7 - UPA 03, Custos de extração florestal, de estradas, de degradação ambiental, custo total, densidade de estradas, densidade média de estradas e espaçamento entre estradas secundárias para os valores atuais além dos valores ótimos e aceitáveis para cada variável.

CENÁRIO	PARÂMETROS AVALIADOS						
	CExt	CEst	CDeg	CTot	DE	DME	EE
	US\$ m ³				m ha ⁻¹	m	m
Planejado	8,30	4,54	1,42	14,26	19,06	245,93	732,39
Executado	8,31	4,52	1,41	14,25	19,00	246,71	1190,97
<i>Tomlin</i>	8,00	5,18	1,62	14,81	21,77	215,32	960,47
<i>Spanning Tree</i>	7,66	6,18	1,93	15,78	25,97	180,5	960,49
Ótima	9,68	2,89	0,90	13,47	12,11	386,98	825,37
Aceitável	8,39	4,38	1,37	14,14	18,41	254,62	543,18

Legenda: Cext: Custo de extração; Cest: Custo de estradas; Cdeg: Custo de degradação; CTot: Custo total; DE: Densidade de estradas; DME: Distância média de extração; EE: Espaçamento entre estradas; Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Ao avaliar as Tabelas 5, 6 e 7 é possível concluir que a densidade calculada de estradas (DE) está associada a um espaçamento de estradas (EE) que auxilia no planejamento em campo, também está relacionada a uma distância média de extração (DME) e obviamente, estes fatores são determinantes para os custos das operações de exploração, qualquer diminuição no custo mesmo que seja 1 dólar por metro é considerado importante para a empresa. Tomando como exemplo a tabela 7, a DE 12,11 m ha⁻¹ está associada ao EE 825,37 m e a DME 386,98 m.

Analisando a malha viária florestal, a densidade florestal manifesta-se como fator importante junto a colheita a ser considerado, por ser relacionada ao método de extração, áreas de estradas e danos permanentes a paisagem. Portanto, o método de extração de madeira determinará uma densidade de estradas maior ou menor, as características e particularidades de cada equipamento e seu uso otimizado irão apontar as melhores alternativas econômicas (ZAGONEL et al., 2005).

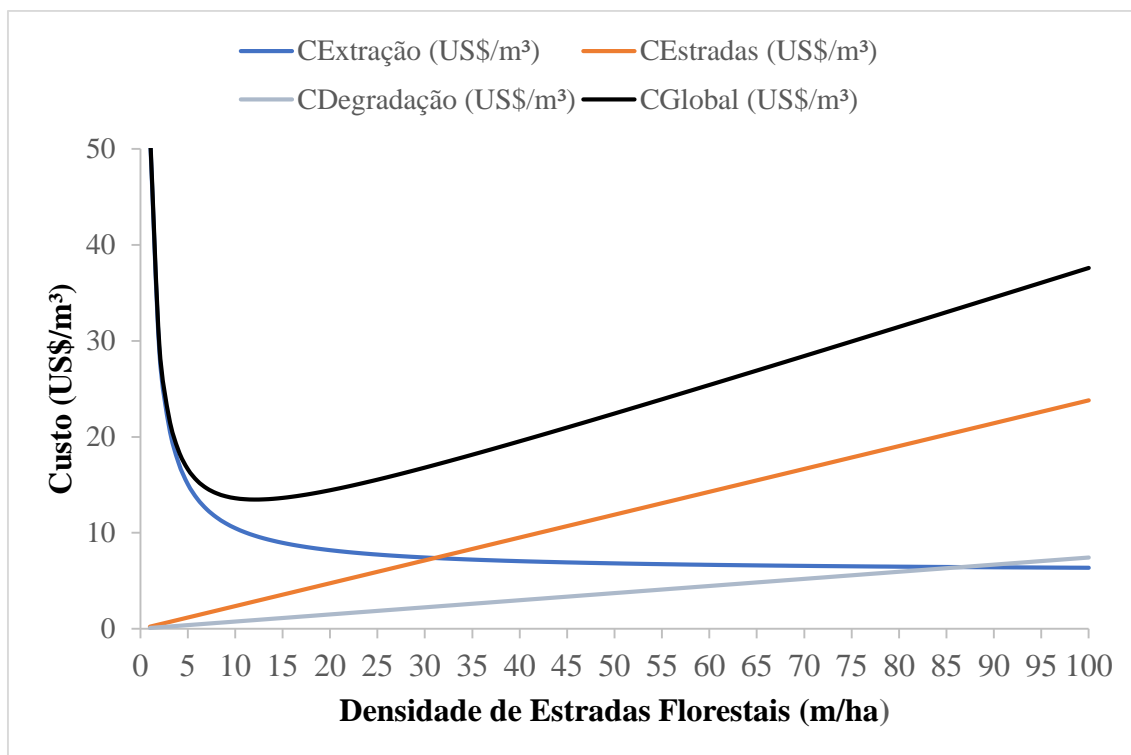
De acordo com Machado (1989), a determinação da densidade ótima de estradas (DOE) é um método quantitativo para estabelecer o volume de estradas de determinada região florestal, otimizando a relação estrada/colheita florestal, em termos técnicos e econômicos. BRAZ (2018) em seu estudo obteve 26 m ha⁻¹ de densidade ótima de estradas, valor superior ao obtido no presente estudo de 12,11 m ha⁻¹. O autor, ao calcular o espaçamento entre estradas obteve o valor de 385 m, inferior ao valor encontrado no presente estudo de 825,37 m. Estimar a densidade ótima de estradas é muitas vezes difícil, pois a condição da área e das operações às vezes não permite a efetiva construção e implantação (SOUZA, 2016).

Teoricamente, a distância entre dois pátios não deve ser menor que a Distância Ótima entre Estradas. Assim, essa definição pode ser empregada como referência para a alocação de pátios, dado que o agrupamento de madeira pode descaratar determinados pontos ou acrescentar outros. Contudo, esse direcionamento auxilia na otimização do arraste e, por conseguinte, diminuição dos custos (BRAZ; OLIVEIRA, 1997).

A densidade final da rede viária é correlacionada com o meio de produção utilizado na exploração, subjetivamente quanto maior for a densidade de estradas, menor será a distância média de extração, finalmente, o que é mais relevante é a soma dos custos de construção de estradas e os custos de extração, procurando-se sempre optar pelo custo total mínimo (MALINOVSKI, J. R. ; PERDONCINI, 1990).

O gráfico abaixo demonstra a variação dos custos de construção e manutenção de estradas, custos de extração com *skidder*, custo de degradação ambiental e o custo global em função do aumento da densidade de estradas, além de mostrar a densidade ótima e aceitável de estradas para a situação, considerando o custo total mínimo.

Figura 13 - Relação entre a densidade de estradas e os custos de estradas, custos de extração e degradação perda de área produtiva para o corte raso em sistema de árvores inteiras.



Legenda: DOE: Densidade ótima de estradas; DAE: Densidade aceitável de estradas; Cextração: Custo de extração; CEstradas: Custo de estradas; Cdegradação: Custo de degradação; Cglobal: Custo global. Fonte: Elaborada pela autora, 2022

No gráfico representado pela Figura 13, as intersecções entre a linha azul (custo de extração) e a linha laranja (custo de estradas), assim como a intersecção entre a linha azul (custo de extração) com a linha cinza (custo de degradação ambiental), são as densidades máximas toleradas, após estes pontos o impacto econômico e ambiental é maior que a quantidade de estradas necessárias. O cruzamento das linhas pode ser interpretado como a definição técnica e o custo global como a definição econômica para o planejamento de estradas. O custo global também demonstra que a densidade ideal de estradas é 5m/ha.

6. CONCLUSÃO

A construção de estradas a partir de modelos teóricos analisados neste estudo apresentaram extensões superiores ao que foi executado pela empresa concessionário do manejo florestal na FLONA Caxiuanã, no estado do Pará. Entretanto, as estradas delineadas pelos modelos têm potencial de causar menores impactos por não afetar Áreas de Proteção Permanente, mantendo o custo de construção em valores próximos ao executado, otimizando a localização do traçado das estradas em campo.

O Modelo 1 Tomlin apresentou o melhor desempenho econômico e ambiental na modelagem de densidade e alocação das estradas florestais na área do plano de manejo. Para as modelagens que utilizaram as árvores como destino final, tanto a Minimum Spanning Tree quanto a Tomlin, não apresentaram bom desempenho quando analisado o comprimento das trilhas de arraste em metros lineares, com soluções aparentemente inviáveis economicamente considerando a alta densidade de estradas modeladas comparadas com as efetivamente construídas para extrair as toras de interesse. Quanto aos valores de Densidade de Estradas, a infraestrutura executada pela empresa apresentou os melhores resultados para as três UPAs.

Recomenda-se para a empresa utilizar o *Tomlin* na modelagem de estradas principais, posteriormente, empregar a penúltima iteração do *Tomlin* como origem e rodar os dados novamente utilizando o *Minimum Spanning Tree* e assim delinear as estradas secundárias. Para obter melhores resultados utilizar os pátios e não as árvores como destinos finais. Fazer o planejamento de estradas utilizando a modelagem que obteve resultados superiores do presente estudo, também apresenta como vantagem o curto período de processamento dos dados para realizar o planejamento. O modelo *Tomlin*, demonstra ser viável para planejar o POA. Finalmente, a partir dos resultados, também é possível concluir que a modelagem *Minimum Spanning Tree* é indicada para delinear trilhas de arraste.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 4^a ed. [s.l: s.n.].

ARIMA, E. Y. et al. Loggers and Forest Fragmentation : Behavioral Models of Road Building in the Amazon Basin. v. 95, n. 3, p. 525–541, 2005.

ARIMA, E. Y. et al. The fragmentation of space in the Amazon basin: Emergent road networks. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 74, n. 6, p. 699–709, 2008.

ARIMA, E. Y.; WALKER, R. T.; VERGARA, D. G. Assessing the Performance of Linear Feature Models: An Approach to Computational Inference. v. 79, n. 9, p. 847–855, 2013.

ASNER, G. P. et al. Select Logging and Its Relation to Deforestation. **Amazonia and Global Change**, p. 43–60, 2009.

BETTINGER, P.; SESSIONS, J. Spatial forest planning: to adopt, or not to adopt? **Journal of Forestry**, v. 101, n. n. 2, p. 24–29, 2003.

BRASIL. **Lei n. 11.284, de 02 do marco de 2006. Dispõe sobre à gestão de florestas públicas para a produção sustentável**. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111284.htm>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA & Serviço Florestal Brasileiro – SFB. **Florestas do Brasil em resumo (Relatório)**, v. Dados de 2, n. Brasília, DF: MMA e SFB, p. 50, 2013.

BRAZ, E. M. Otimização da rede de estradas secundárias em projetos de manejo sustentável de floresta tropical. **Circular técnica. Embrapa**, v. N.15, n. Março, p. 37, 1997.

BRAZ, E. M. et al. Densidade ótima de estradas para a exploração em Plano de Manejo Florestal. p. 45–49, 2018.

BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. Planejamento de arraste mecanizado em floresta tropical. **ARS (São Paulo)**, v. 17, n. 35, p. 1–6, 1997.

CAIXETA-FILHO, J. V. **Pesquisa operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais**. 2^a ed. [s.l.: s.n.].

CEMAL. Plano de Manejo Florestal Sustentável Pracupi, UMF III, Flona de Caxiuanã. **Syria Studies**, v. 7, n. 1, p. 122, 2017.

COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V. A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 14, n. 4, p. 397–406, 2000.

CONTRERAS, M. A.; CHUNG, W. A modeling approach to estimating skidding costs of individual trees for thinning operations. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 26, n. 3, p. 133–146, 2011.

COPERTINO, M.; TERESA, M.; PIEDADE, F. Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Amazônia. 2019.

DIAS, E. C. Gestão das florestas públicas. [Http://Www2.Icnf.Pt/Portal/Florestas/Gf](http://www2.icnf.pt/portal/florestas/Gf), p. 281–300, 2007.

EMMERT, F. Combinação de dados de campo e métodos computacionais para o planejamento da exploração florestal na amazônia. p. 190, 2014.

ESPADA, A. L. V. et al. Manejo florestal e exploração de impacto reduzido em florestas naturais de produção da Amazônia. 2016.

FIELD, C. ET AL. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and

oceanic components. **Science**, v. 281, n. n. 237, 1998.

FIGUEIREDO, E. O. et al. Equations To Estimate Tree Gaps in a Precision Forest Management Area the Amazon Based on Crown Morphometry. **Revista Árvore**, v. 41, n. 3, 2018.

GRIGOLATO, S.; MOLOGNI, O.; CAVALLI, R. GIS applications in forest operations and road network planning: An overview over the last two decades. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 38, n. 2, p. 175–186, 2017.

HALLEUX, O. R. Setting analyst: a practical harvest planning technique. p. 127–132, 2001.

HAYATI, E.; MAJNOUNIAN, B.; ABDI, E. Qualitative evaluation and optimization of forest road network to minimize total costs and environmental impacts. **IForest**, v. 5, n. 3, p. 121–125, 2012.

HERNANDES, F.; SAMPAIO, C. B. O Problema da Árvore Geradora Mínima Fuzzy : um algoritmo para o caso envolvendo incertezas nos pesos das arestas e na estrutura da rede. 2016.

IN: METZ, B. E. AL. (ED. . **Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers. **Anais...**Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA: 2007.

JOHNS, J. S.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. v. 89, p. 59–77, 1996.

JOURGHOLAMI, M.; ABDI, E.; CHUNG, W. Decision making in forest road planning considering both skidding and road costs: a case study in the Hyrcanian Forest in Iran. v. 6, p. 59, 2013.

KLEINSCHROTH, F.; HEALEY, J. R. Impacts of logging roads on tropical forests. v. 49, n. 5, p. 620–635, 2017.

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. Ciência do trabalho florestal. **Imprensa Universitária**, p. 65, 1988.

MACHADO, C. C. Sistema brasileiro de classificação de estradas florestais (SIBRACEF): Desenvolvimento e relação como o meio de transporte florestal rodoviário. **Universidade Federal do Paraná**, v. Tese Douto, p. 188, 1989.

MALHI, Y. ET AL. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. n. 5.860, p. 169–172, 2008.

MALINOVSKI, J. R. ; PERDONCINI, W. C. Estradas Florestais. **Publicação Técnica do Colégio de Irati – GTZ**, p. 100, 1990.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 5, p. 1117–1129, 2010.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Assessment of forest disturbances by selective logging and forest fires in the Brazilian Amazon using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 4, p. 1057–1086, 2013.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 369, n. 6509, p. 1378–1382, 2020.

MELLO, N. G. R. DE; ARTAXO, P. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, n. 66, p. 108, 2017.

MILLER, S. D. et al. Reduced impact logging minimally alters tropical rainforest carbon and energy exchange. **Proceedings of the National Academy of Sciences of**

the United States of America, v. 108, n. 48, p. 19431–19435, 2011.

NEPSTAD, D. C. et al. Large-scale impoverishment of amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505–508, 1999.

OLIVEIRA, L. L. et al. Sazonalidade e interceptação da chuva na Floresta Nacional em Caxiuanã - Amazônia Oriental. **Scientia Plena**, v. 7, n. n. 10, p. 285–294, 2011.

OSTROSKI, A. Teoria dos grafos e aplicações. **Synergismus scyentifica UTFPR**, v. 4, 2010.

PERAZZONI, F. Informação geográfica, sustentabilidade e Amazônia: Geointeligência aplicada à avaliação de Manejos Florestais Sustentáveis no Sul do Amazonas. 2021.

PEREIRA, L. D. P.; SOBRINHO, M. V.; FLORES, M. DO S. A. A política de concessão em florestas públicas no estado do Pará: o caso da unidade de manejo florestal (umf) iii da gleba estadual mamuru. v. 11, p. 43–74, 2019.

PEREIRA, R. et al. Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 168, n. 1–3, p. 77–89, 2002.

PINAGÉ, E. R. Estudo dos impactos da exploração madeireira em áreas de concessão florestal utilizando imagens orbitais. **Departamento De Engenharia Florestal**, p. 88, 2014.

PINAGÉ, E. R.; MATRICARDI, E. A. T. Detection of logging infrastructure in the state of rondônia using remotely sensed data [Detecção da infraestrutura para exploração florestal em rondônia utilizando dados de sensoriamento remoto]. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 377–390, 2015.

PINARD, M. A.; PUTZ, F. E. Retaining Forest Biomass by Reducing Logging Damage
Author (s): Michelle A . Pinard and Francis E . Putz Published by : Association for

Tropical Biology and Conservation Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/2389193>
Accessed : 21-05-2016 14 : 12 UTC. v. 28, n. 3, p. 278–295, 2016.

PRIM, R. C. Shortest Connection Networks And Some Generalizations. **Bell System Technical Journal**, v. 36, n. 6, p. 1389–1401, 1957.

PUTZ, F. E. et al. Reduced-impact logging: Challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 7, p. 1427–1433, 2008.

RIBEIRO, A. C. F.; FONSECA, L. C. DA; PEREIRA, C. M. P. O Plano de Manejo Florestal como instrumento de desenvolvimento sustentável na Amazônia. v. 11, 2020.

RIVERO, S. et al. Pecuária e desmatamento : uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. v. 19, n. 1, p. 41–66, 2009.

RODRIGUES, M. I. et al. Concessão florestal na Amazônia brasileira. p. 1299–1308, 2020.

ROGERS, L. PEGGER & ROADVIEW – A New GIS Tool To Assist Engineers in Operations Planning. **The Internacional Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium**, p. 177–182, 2001.

SANTOS, P. H. A. et al. Produtividade e custos de extração de madeira de eucalipto com Clambunk Skidder. **Revista Arvore**, v. 37, n. 3, p. 511–518, 2013.

SILVA, F. et al. Classification of Forest Roads and Determination of Route Using Geographic Information System. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 329–335, 2016.

SILVA, J. N. M. **Manejo florestal**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1996.

SOUZA, F. L. Densidade de estradas em povoamentos de Pinus taeda l. em regime de desbastes e corte raso. p. 126, 2016.

SPEIDEL, G. **Economia florestal**. UFPR ed. Curitiba, PR.: [s.n.].

TOMLIN, C. . D. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. p. 249, 1990.

UHL, C. et al. Natural resource management in the Brazilian amazon: An integrated research approach. **BioScience**, v. 47, n. 3, p. 160–168, 1997.

VERISSIMO, A. et al. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: The case of Paragominas. **Forest Ecology and Management**, v. 55, n. 1–4, p. 169–199, 1992.

VERÍSSIMO, A. et al. Extraction of a high-value natural resource in Amazonia: the case of mahogany. **Forest Ecology and Management**, v. 72, n. 1, p. 39–60, 1995.

VIANA, L. A. D. C. Árvore geradora com dependência mínima. **Ucv**, v. I, n. 02, p. 0–116, 2016.

WALLIS, W. D. **A beginner's guide to graph theory**. [s.l: s.n.].

YU, C.; LEE, J.; MUNRO-STASIUK, M. Extensions to least- cost path algorithms for roadway planning. 2003.

ZAGONEL, R. et al. Análise da densidade ótima de estradas de uso florestal em relevo plano de áreas com produção de Pinus taeda. 2005.

8. APÊNDICES

Apêndice 1 - Skidders utilizados pela empresa CEMALL.

Tipos de Skidders		Ano
1	SKIDDER 518 C	1995
2	SKIDDER 518 C	1996
3	SKIDDER 525 C	2014
4	SKIDDER 525 D	2015

Apêndice 2 - Dados fornecidos pela CEMAL.

DADOS EMPRESA	
Número de Toras	50
Volume Médio Tora (m ³)	2,5
Jornada Trabalhada (horas)	8
Produtividade (m ³ /hora)	15,63
Tempo Ciclo Operacional (min)	9,6

Apêndice 3 - Premissas utilizadas para os cálculos.

PREMISSAS	
Ciclo Operacional	Skidder Garra
VSC (m/min)	151,67
TC (min)	9,91
VCC (m/min)	71,67
TD (min)	2,48
Emmert (2010)	%
VV	
TC	9,91
VC	
Zagonel (2008)	%
TC	74,18
TD	25,82
TOTAL	100