



APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA LiDAR NO  
MONITORAMENTO DA EXPLORAÇÃO MADEIREIRA EM  
ÁREAS DE CONCESSÃO FLORESTAL

CHARTON JAHN LOCKS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA LiDAR NO  
MONITORAMENTO DA EXPLORAÇÃO MADEIREIRA EM  
ÁREAS DE CONCESSÃO FLORESTAL**

**CHARTON JAHN LOCKS**

**ORIENTADOR: ERALDO A. T. MATRICARDI**  
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM - 288/2017**

**BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2017**

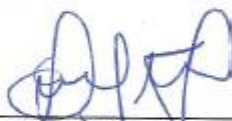
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA LIDAR NO  
MONITORAMENTO DA EXPLORAÇÃO MADEIREIRA  
EM ÁREAS DE CONCESSÃO FLORESTAL”

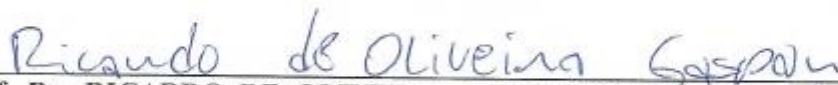
**CHARTON JAHN LOCKS**

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

APROVADA POR:



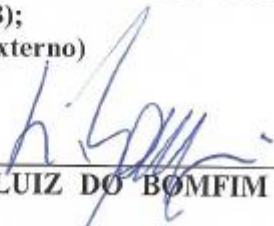
Prof. Dr. ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI (Departamento de  
Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Orientador)



Prof. Dr. RICARDO DE OLIVEIRA GASPAR (Departamento de Engenharia  
Florestal – EFL/UnB).  
(Examinador Interno)



Dr. HUMBERTO NAVARRO DE MESQUITA JÚNIOR (Serviço Florestal  
Brasileiro - SFB);  
(Examinador Externo)



Dr. SÉRGIO LUIZ DO BOMFIM (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente -  
IBAMA);  
(Examinador Externo)

Brasília-DF, 06 de fevereiro de 2017.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Locks, Charton Jahn

Aplicações da tecnologia LiDAR no monitoramento da exploração madeireira em áreas de concessão florestal / Charton Jahn Locks; orientador Eraldo T. Matricardi. – Brasília, 2017. 97 p.

Dissertação (Mestrado – Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, 2017

- |                                   |                                    |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Manejo Florestal               | 2. Impacto da exploração florestal |
| 3. LiDAR                          | 4. Volume explorado                |
| I. Matricardi, Eraldo T., orient. | II. Título.                        |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOCKS, C. J. (2017). Aplicações da tecnologia LiDAR no monitoramento da exploração madeireira em áreas de concessão florestal. PPGEFL.DM-288/2017. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Charton Jahn Locks

TÍTULO: Aplicações da tecnologia LiDAR no monitoramento da exploração madeireira em áreas de concessão florestal.

GRAU: Mestre

ANO: 2017

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

---

Charton Jahn Locks  
SMPW, Qd. 26, Conj. 7, Lote 10, Casa D  
70.745-607 Brasília – DF – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus, que guia meu caminho, me traz luz e serenidade.

Ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB), por proporcionar total apoio para a realização deste trabalho, além da disponibilização de dados de campo e também nuvens de pontos LiDAR.

Aos meus colegas da Gerência de Monitoramento e Auditoria Florestal (GEMAF), Claudio Cavalcanti, Luísa Resende e Eduardo Riviello pelas contribuições e ricas discussões que tivemos. Em especial aos meus colegas Dr. Sergio Bomfim e José Humberto, pela paciência e por compartilhar comigo uma significativa parte do seu vasto conhecimento na área florestal.

Ao professor Dr. Eraldo Matricardi, por aceitar me orientar nesta dissertação. Sua visão e conselhos tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Ao meu segundo orientador Dr. Humberto Navarro, que além das inúmeras boas contribuições técnicas me ajudou a manter o entusiasmo na construção deste trabalho. Meu colega Leandro Biondo companheiro de jornada durante o mestrado.

As empresas concessionárias do SFB, que se esforçam para fazer do manejo florestal sustentável uma atividade próspera. A coleta de dados realizada por elas foi determinante para a realização deste estudo.

Ao Projeto Paisagens Sustentáveis, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que cedeu parte dos dados LiDAR utilizados neste estudo. Dados adquiridos com apoio financeiro da Agência para o Desenvolvimento Internacional Norte Americana (USAID) e do Departamento de Estado Norte Americano (USDS) e com apoio técnico do Serviço Florestal Norte Americano (USFS).

A minha querida mãe Carmen e minhas irmãs Marjorie e Nicole, pelo carinho e alegria.

**Dedico este trabalho à minha esposa  
Aline e meus filhos Vitor e Pedro.  
Sem vocês nada disso faria sentido.**

## RESUMO

### APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA LiDAR NO MONITORAMENTO DA EXPLORAÇÃO MADEIREIRA EM ÁREAS DE CONCESSÃO FLORESTAL

**Autor:** Charton Jahn Locks

**Orientador:** Eraldo A. T. Matricardi

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, Fevereiro de 2017**

O mapeamento de áreas afetadas pela exploração seletiva de madeiras e a obtenção de estimativas rápidas e confiáveis do volume de madeira explorado são componentes críticos no processo de monitoramento dos Planos de Manejo Florestal Sustentável implementados na Amazônia brasileira. Com a finalidade de aperfeiçoar este monitoramento, novas tecnologias de sensoriamento remoto têm sido testadas, entre elas se destaca o perfilamento a laser aerotransportado ou LiDAR (*Light Detection And Ranging*). O uso do LiDAR permite a obtenção de uma nuvem de pontos em três dimensões da área estudada, tornando possível analisar a estrutura da floresta com precisão. Este estudo buscou avaliar o uso de dados LiDAR aerotransportado no mapeamento das áreas de exploração seletiva, mensurar os danos causados na floresta pós-exploração, bem como estimar o volume de madeira explorado em uma área de floresta tropical. Para isso foram utilizados dados de campo e nuvens de pontos obtidas utilizando um Sistema LiDAR Aerotransportado (*Airborne LiDAR System – ALS*), em 21 Unidades de Produção Anual, exploradas via Manejo Florestal Sustentável, e distribuídas espacialmente dentro dos limites das Florestas Nacionais do Jamari/RO, Jacundá/RO e de Saracá-Taquera/PA. O uso da métrica LiDAR denominada Modelo de Densidade Relativa (RDM), considerando o extrato de 1 a 5 m de altura em relação ao terreno, explicita o retrato pós-exploratório da área. A partir da interpretação visual da imagem LiDAR, foi possível digitalizar a infraestrutura de exploração e, a partir de medidas de largura destas infraestruturas obtidas em campo, estimar a área de floresta impactada pela extração seletiva de madeiras, com resultados similares aos de levantamento de campo utilizando GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de navegação. A partir da métrica LiDAR denominada Modelo de Altura do Dossel (CHM) foi possível identificar as áreas de clareiras e, dessa maneira, estimar a abertura do dossel florestal em uma área explorada. Não foi possível, com apenas uma cobertura LiDAR, estimar o dano no dossel decorrente da exploração florestal. Para isso, foi necessária a comparação do CHM antes e após a exploração da área. A partir de técnica de regressão linear e a combinação de variáveis LiDAR com informações extraídas de parcelas permanentes foi possível desenvolver equações capazes de estimar com precisão o volume do fuste e a área basal para a Floresta Nacional do Jamari/RO. A combinação dos produtos de volume de fuste modelado, obtidos antes e após a exploração florestal, foi capaz de prover informações satisfatórias quanto a intensidade de exploração da área objeto de manejo. Os resultados do presente estudo tem potencial para contribuir com a melhoria do atual sistema de monitoramento e controle da exploração florestal na Amazônia Brasileira.

**Palavras-chave:** LiDAR, Manejo Florestal Sustentável, Concessões Florestais, Impactos, Monitoramento

## **ABSTRACT**

### **USE OF LIDAR TECHNOLOGY TO MONITOR LOGGING ACTIVITIES IN FOREST CONCESSION AREAS**

**Author: Charton Jahn Locks**

**Supervisor: Eraldo A. T. Matricardi**

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, February 2017**

Map selective logging and obtain a fast and reliable estimation of the exploited timber volume are critical components in the monitoring process of the Sustainable Forest Management Plans that occur in the Amazon. In order to improve this monitoring, new remote sensing technology has been tested, among them stands out the Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR). The LiDAR data consist in a 3-D point cloud of the study area, enabling high precision forestry structure analysis. This study aims to assess the use of airborne LiDAR data to map the areas of selective logging, measure the damage, and estimate the volume of timber exploited in a tropical Forest region. Will be used, field data and LiDAR point clouds for 21 areas of interest, distributed by the Jamari/RO, Jacundá/RO and Saracá-Taquera/PA National Forests. The use of the Relative Density Model (RDM), a LiDAR derived metric, obtained considering the return density between 1 to 5 m height from the ground, provide a realistic post-exploratory picture of the area. Through visual interpretation it is possible to digitize all the exploration infrastructures, as well as, combining the width measurements of these infrastructures, obtained in the field, it is possible to estimate the impacted area, reaching similar results of those provided only from field survey using navigation GNSS equipment. From another LiDAR metric, the Canopy Height Model (CHM), it is possible to identify the gap areas and thus estimate the opening of the forest canopy in a logged area. It is not possible, considering only one LiDAR coverage, to estimate the canopy damage resulting from the forest exploitation, for this it is necessary to compare the CHM before and after the logging. Through the combination of LiDAR variables with information extracted from permanent plots, it was possible, using a linear regression technique, to develop models capable of accurately estimating the bole volume and the basal area for the Jamari/RO National Forest. Combining the stem volume products, obtained before and after selective logging, it is possible to reach satisfactory information regarding the exploitation intensity for the logged area. The results of the present study have the potential to contribute to the improvement of the current monitoring system of forest logging in the Brazilian Amazon.

**Key-words:** LiDAR, Sustainable Forest Management, Forest Concession, Impacts, Monitoring

# SUMÁRIO

1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.1.	PROBLEMA DA PESQUISA .....	1
1.1.1.	Questões da pesquisa.....	4
1.1.2.	Objetivo.....	4
1.1.3.	Objetivos específicos.....	4
1.2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	4
1.2.1.	Manejo florestal sustentável.....	4
1.2.2.	Danos à floresta remanescente .....	6
1.2.3.	Serviço Florestal Brasileiro e as Concessões Florestais.....	8
1.2.4.	O monitoramento da exploração florestal na Amazônia Brasileira.....	9
1.2.5.	LiDAR.....	11
1.2.6.	Estimativas biométricas da floresta utilizando LiDAR.....	13
1.3.	VISÃO GERAL DA PESQUISA .....	14
2.	MAPEAMENTO E MENSURAÇÃO DOS IMPACTOS DA EXPLORAÇÃO SELETIVA DE MADEIRAS EM ÁREAS DE CONCESSÃO FLORESTAL NA AMAZÔNIA .....	15
2.1.	RESUMO .....	15
2.2.	INTRODUÇÃO .....	16
2.3.	MATERIAL E MÉTODOS .....	17
2.3.1.	Área de estudo.....	17
2.3.2.	Dados utilizados .....	20
2.3.3.	Processamento dos dados .....	21
2.4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
2.4.1.	Mapeamento do dano no sub-bosque .....	27
2.4.2.	Validação do mapeamento dos danos no sub-bosque .....	33
2.4.3.	Mapeamento de clareiras.....	36
2.4.4.	Mapeamento do dano no dossel .....	41
2.4.5.	Validação do mapeamento do dano no dossel.....	42



2.5.	CONCLUSÕES.....	43
3.	ESTIMATIVA DO VOLUME DE MADEIRA EXPLORADO VIA MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL UTILIZANDO DADOS LIDAR. ....	45
3.1.	RESUMO DA PESQUISA .....	45
3.2.	INTRODUÇÃO .....	46
3.3.	MATERIAL E MÉTODOS .....	48
3.3.1.	Área de estudo.....	48
3.3.2.	Dados utilizados .....	48
3.3.3.	Processamento dos dados .....	51
3.4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
3.4.1.	Estimativa do volume de fuste .....	56
3.4.2.	Ajuste do modelo para área basal.....	57
3.4.3.	Ajuste do modelo para volume de fuste .....	61
3.4.4.	Aplicação do modelo.....	65
3.5.	CONCLUSÕES.....	68
4.	CAPÍTULO IV: PRINCIPAIS CONCLUSÕES .....	69
4.1.	REVISITANDO AS QUESTÕES DE PESQUISA .....	69
4.1.1.	Quais os danos causados pela extração seletiva de madeiras na estrutura das florestas sob concessão federal?.....	69
4.1.2.	Como dados LiDAR podem ser utilizados para estimar tais danos? É possível mapear e mensurar estes danos através de classificação automática?.....	69
4.1.3.	Qual a relação entre dados LiDAR e as variáveis biofísicas obtidas a partir de levantamentos em campo obtidas em parcelas permanentes?.....	70
4.2.	CONTEXTO DESTA PESQUISA NO MONITORAMENTO DA EXPLORAÇÃO DE MADEIRA NA AMAZÔNIA.....	71
4.3.	PRINCIPAIS CONCLUSÕES .....	71
4.4.	OPORTUNIDADE PARA ESTUDOS FUTUROS .....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Dano a floresta remanescente após evento de exploração madeireira.....	7
Tabela 1.2. Aplicações florestais de dados LiDAR.....	13
Tabela 2.1. Dados detalhados das áreas de interesse..	19
Tabela 2.2. Especificação técnica e custo das coletas de dados LiDAR.....	21
Tabela 2.3. Estimativa da infraestrutura de exploração florestal presente no sub-bosque para cada uma das áreas de interesse a partir de dados LiDAR e interpretação visual. ....	28
Tabela 2.4. Estimativa dos danos no sub-bosque decorrentes da exploração seletiva de madeira em áreas de manejo florestal sustentável para cada uma as áreas de interesse deste estudo. ....	29
Tabela 2.5. Comparação dos resultados da mensuração manual e automática de dano no sub-bosque decorrente da exploração florestal para cada uma as áreas de interesse deste estudo.....	31
Tabela 2.6. Comparação do quantitativo de mapeamento dos danos a floresta remanescente utilizando dados de campo (GNSS) e dados LiDAR e sua acurácia.....	35
Tabela 2.7. Resultado da avaliação da acurácia posicional dos danos a floresta remanescente utilizando dados de campo (GNSS) e do mapeamento automatizado baseado em LiDAR. ....	35
Tabela 2.8. Estimativa dos impactos no dossel florestal resultantes da abertura de clareiras identificadas nas áreas de interesse, exploradas via manejo florestal sustentável.....	38
Tabela 2.9. Resultado da mensuração da área de clareiras decorrentes do manejo florestal sustentável.....	38
Tabela 2.10. Área total de dossel afetada pelo manejo florestal sustentável. ....	41
Tabela 2.11. Resultado da avaliação da acurácia posicional das árvores exploradas, mapeadas em campo com GNSS de navegação, e o dano no dossel, identificado a partir da diferença entre os Modelos de Altura do Dossel obtidos antes e após a exploração florestal.....	42
Tabela 3.1. Características das parcelas permanentes utilizadas neste estudo .....	49
Tabela 3.2. Especificação técnica das coletas de dados LiDAR .....	51
Tabela 3.3. Variáveis estatísticas extraídas da nuvem de pontos LiDAR, utilizadas neste estudo. ....	52
Tabela 3.4. Estimativa do volume de fuste para as parcelas permanentes deste estudo .....	56
Tabela 3.5. Análise de variância para comparação dos diferentes modelos de regressão linear gerados para estimar a área basal .....	58
Tabela 3.6. Resumo da estatística dos diferentes modelos de regressão linear gerados para área basal.....	58
Tabela 3.7. Resumo da análise de significância dos coeficientes do modelo de regressão linear para área basal.....	59

Tabela 3.8. Análise de variância para comparação dos diferentes modelos de regressão linear gerados para estimar o volume de fuste .....	62
Tabela 3.9. Resumo da estatística dos diferentes modelos de regressão linear gerados para volume de fuste .....	63
Tabela 3.10. Resumo da análise de significância dos coeficientes do modelo de regressão linear para volume de fuste .....	63
Tabela 3.11. Diferença entre os valores estimados, utilizando dados LiDAR, e observados em campo para intensidade de exploração florestal em parcelas de 25 hectares. ....	66

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplo de nuvem de pontos LiDAR da Floresta Nacional do Jamari/RO.....	3
Figura 1.2. Degradação florestal na Amazônia Legal de acordo com os dados do SAD e do DEGRAD.....	10
Figura 1.3. Princípios e componentes de um sistema LiDAR aerotransportado.....	11
Figura 2.1. Localização da área de estudo e das 21 amostras de dados LiDAR em áreas florestais exploradas seletivamente.....	18
Figura 2.2. Representação gráfica da estimativa do valor de densidade relativa para cada célula. .	23
Figura 2.3. Representação gráfica da geração do Modelo de Altura do Dossel.....	25
Figura 2.4. Fluxograma para o mapeamento automático dos impactos da exploração seletiva no dossel florestal.....	26
Figura 2.5. Imagens LiDAR utilizadas para o mapeamento dos impactos no sub-bosque florestal utilizando LiDAR.....	27
Figura 2.6. Correlação entre dano no sub-bosque e IEX=Intensidade de Exploração.....	30
Figura 2.7. Comparação visual entre o dano no sub-bosque mapeado de maneira manual e automática.....	32
Figura 2.8. Validação da digitalização, baseada em dados LiDAR, do dano a floresta remanescente com o mapeamento utilizando GNSS em campo.....	34
Figura 2.9. Validação da classificação, baseada em dados LiDAR, do dano a floresta remanescente com o mapeamento utilizando GNSS em campo.....	36
Figura 2.10. Identificação de clareiras em uma área submetida a exploração de madeira via Manejo Florestal Sustentável.....	37
Figura 2.11. Identificação de clareiras em uma área de floresta antes (a) e após (b) a exploração de madeira via Manejo Florestal Sustentável.....	40
Figura 2.12. Correlação entre a área de clareiras decorrentes da exploração florestal e a IEX=Intensidade de Exploração.....	41
Figura 2.13. Alterações no Modelo de Altura do Dossel de uma floresta objeto de manejo florestal sustentável.....	42
Figura 2.14. Representação da avaliação da acurácia posicional das árvores exploradas, mapeadas em campo com GNSS de navegação, o dano no dossel, identificado a partir da diferença entre os Modelos de Altura do Dossel obtidos antes e após a exploração florestal.....	43
Figura 3.1. Localização e distribuição espacial das parcelas permanentes utilizadas neste estudo.	50

Figura 3.2. Croqui contendo a espacialização da infraestrutura de exploração e das árvores inventariadas e abatidas.....	51
Figura 3.3. Distribuição das parcelas virtuais sobre as áreas com cobertura LiDAR multitemporal e árvores exploradas via manejo florestal sustentável. ....	55
Figura 3.4. Representação do ajuste da regressão linear considerando modelos lineares de diferente complexidade para estimativa da área basal.....	57
Figura 3.5. Valores preditos pelo modelo que utiliza as variáveis explanatórias LiDAR plotados contra valores observados nas parcelas de campo para área basal. ....	60
Figura 3.6. Distribuição gráfica dos resíduos do modelo de área basal. ....	60
Figura 3.7. Probabilidade normal para os dados de área basal.....	61
Figura 3.8. Representação do ajuste da regressão linear considerando modelos lineares de diferente complexidade para estimativa do volume de fuste.....	62
Figura 3.9. Valores preditos pelo modelo que utiliza as variáveis explanatórias LiDAR plotados contra valores observados nas parcelas de campo para volume de fuste. ....	64
Figura 3.10. Distribuição gráfica dos resíduos do modelo de volume de fuste.....	64
Figura 3.11. Distribuição de probabilidade normal para os dados de volume de fuste.....	65
Figura 3.12. Localização das árvores exploradas sobrepostas a métrica da diferença do volume de fuste antes e após a exploração florestal.. ....	67

## **LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES**

ALS – *Airborne LiDAR System*

CHM – *Canopy Height Model*

DAP – Diâmetro à Altura do Peito

DEGRAD – Sistema de Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira

DETEX – Sistema de Detecção da Exploração Seletiva de Madeira

DTM – *Digital Terrain Model*

EIR - Exploração de Impacto Reduzido

FLONA - Floresta Nacional

GEMAF – Gerência Executiva de Monitoramento e Auditoria Florestal

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

GPS - *Global Positioning System*

IF – Inventário Florestal

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LiDAR - *Light Detection and Ranging*

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

RDM – *Relative Density Model*

SAD – Sistema de Alerta de Desmatamento

SFB – Serviço Florestal Brasileiro

UMF - Unidade de Manejo Florestal

UPA - Unidade de Produção Anual

# **1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

## **1.1. PROBLEMA DA PESQUISA**

A exploração seletiva de madeira representa uma importante atividade econômica para a Amazônia Brasileira (ASNER et al., 2005). Matricardi et al. (2013) utilizaram dados de sensoriamento remoto e estimaram que mais de 17.000 km<sup>2</sup> de florestas foram impactadas pela extração seletiva e/ou fogo na Amazônia em 1999. Souza et al. (2013) estimaram que no período compreendido entre os anos de 2000 e 2010, uma área de aproximadamente 50.000 km<sup>2</sup> de floresta amazônica brasileira sofreu algum tipo de degradação, seja através da exploração seletiva de madeira ou, fogo.

De acordo com Merry et al. (2009), se for possível estabelecer uma indústria florestal produtiva e responsável na Amazônia, a exploração seletiva de madeira nesta região pode se tornar uma fonte de desenvolvimento social e econômico para o Brasil sem necessariamente degradar o meio ambiente. Um dos problemas vivido hoje na Amazônia brasileira, entretanto, está relacionado a ilegalidade do setor madeireiro que lá opera, que ao promover a exploração predatória de áreas de floresta, desencadeia outros impactos negativos ao meio ambiente como alterações nos processos hidrológicos, erosão do solo, aumento da susceptibilidade da floresta ao fogo, redução no estoque de carbono e da biodiversidade (NEPSTAD et al., 1999; ASNER et al., 2005; MATRICARDI, 2007). Além disso, um mercado dominado pela madeira proveniente de exploração ilegal reduz a competitividade das empresas que operam dentro da legalidade e tem que arcar com os custos socioambientais e tributários inerentes a atividade, como por exemplo, as empresas concessionárias que operam em florestas públicas.

Portanto, o monitoramento da exploração florestal seletiva na Amazônia Brasileira é essencial para garantir a sustentabilidade das atividades do setor florestal na região. As atividades de monitoramento estão fortemente baseadas em duas linhas de atuação: dados e técnicas de sensoriamento remoto e inspeções em campo. A análise periódica de imagens de satélite de média resolução, principalmente através da aplicação de modelos de mistura espectral e índices de vegetação, que destacam as áreas de floresta alteradas pelas atividades de exploração florestal. Ou, o intenso trabalho de campo para verificação das áreas exploradas in loco. Combinadas, estas duas atividades constituem-se em fortes

instrumentos de apoio ao controle da exploração florestal. Entretanto, alguns dos problemas dessas atividades de monitoramento são destacados a seguir.

- A quantificação das alterações que ocorrem abaixo do nível do dossel florestal, como abertura de estradas, trilhas de arraste e pequenos pátios de estocagem ainda é um desafio para sensores orbitais óticos (COOPS et al., 2007, PINAGÉ & LOCKS, 2014) e altamente custosa para ser executada através de vistorias de campo.
- Os mapeamentos via satélite da área de floresta degradada na Amazônia Legal para o ano de 2014, realizados pelo Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD) do IMAZON, e pelo Projeto de Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira (DEGRAD) do INPE, produziram dados consideravelmente discrepantes, 2.213km<sup>2</sup> e 4.258km<sup>2</sup> respectivamente, corroborando com a afirmação de que o mapeamento das florestas degradadas por exploração seletiva de madeira e fogo não é uma tarefa trivial.
- O uso de imagens de satélite e a realização de vistorias de campo não têm sido suficientemente capazes de validar se a quantidade de madeira extraída em uma determinada área corresponde ao volume efetivamente autorizado no processo de licenciamento. Fica a cargo dos sistemas de controle florestal (DOF<sup>1</sup>, SISFLORA<sup>2</sup>, etc) fazer esse controle, através de uma lógica de balanço de massa, tornando a relação “área explorada - volume explorado” uma relação indireta e sujeita a fraudes.

O monitoramento da exploração seletiva de madeira na Amazônia sempre foi um desafio para o Governo Brasileiro, e o Serviço Florestal Brasileiro (SFB), por ser o órgão responsável pelo monitoramento da exploração em áreas de Florestal Públicas Federais, tem buscado maneiras de aperfeiçoá-lo. O ambiente altamente controlado de uma concessão florestal, onde atuam IBAMA, ICMBio e SFB, favorece as iniciativas de desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias que, depois de validadas, podem ser empregadas em larga escala em toda a Amazônia brasileira. Aprimorar o monitoramento

---

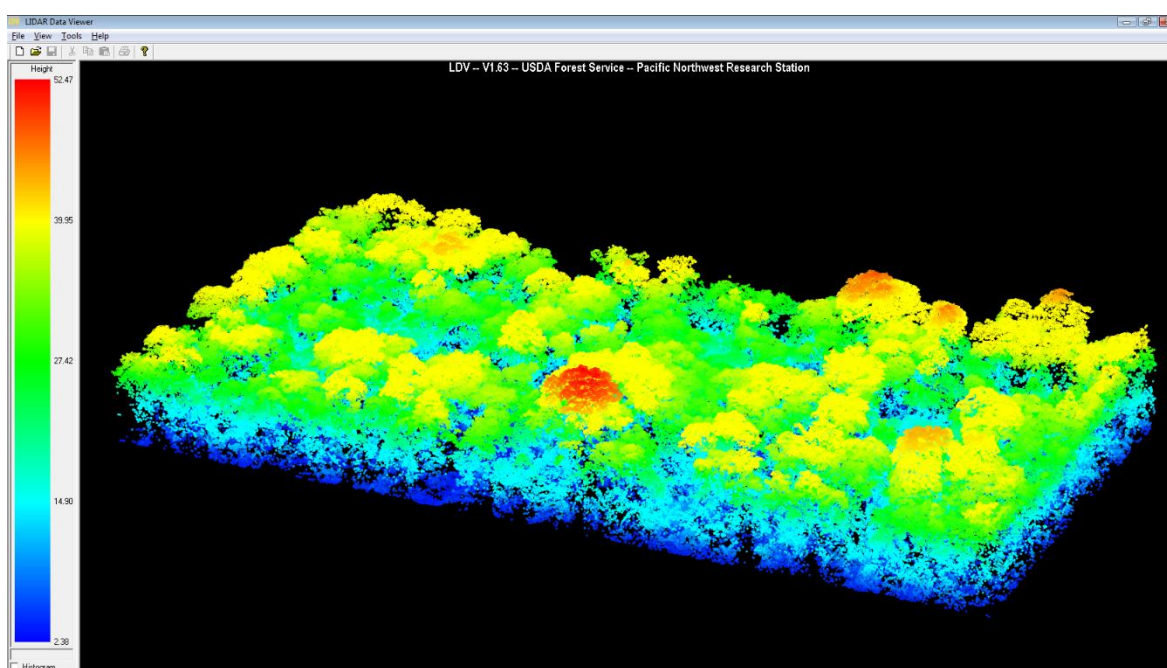
<sup>1</sup> DOF, Documento de Origem Florestal.

<sup>2</sup> SISFLORA, Sistema de Comercialização e Transporte de Produtos Florestais.



da exploração de madeira na Amazônia é de fundamental importância para ajudar a resolver os problemas citados acima e a tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) tem potencial para colaborar neste aprimoramento.

A tecnologia LiDAR é baseada na medição precisa do tempo que um pulso de luz enviado leva do transmissor ao alvo e de volta ao receptor. Uma vantagem dos sensores de varredura a laser em relação aos sensores óticos passivos para aplicações florestais, que pode ser visualizada na Figura 1.1, é a capacidade do feixe laser de penetrar por pequenas aberturas no dossel da floresta e fornecer informações sobre o sub-bosque e sobre a topografia do terreno (JENSEN, 2009).



**Figura 1.1.** Exemplo de nuvem de pontos LiDAR da Floresta Nacional do Jamari/RO (UMF I – UPA 1), obtida no ano de 2011. A gradação de cores esta associada a altura do retorno em relação ao terreno, quanto mais alto mais vermelho, quanto mais próximo ao terreno, azul mais escuro.

Da nuvem de pontos LiDAR é possível extrair uma grande quantidade de informações, um destaque pode ser dado as suas métricas, que são imagens em formato raster que traduzem características da nuvem de pontos, elas podem ser classificadas em métricas de altura, densidade e intensidade (USFS, 2014). Com a tecnologia LiDAR é possível realizar medidas diretas, como a altura das árvores, bem como estimar parâmetros estruturais importantes da floresta, como a biomassa da parte aérea, área basal e diâmetro, usando técnicas de modelagem (DUBAYAH et al., 2000).

### **1.1.1. Questões da pesquisa**

Diante dos problemas de pesquisa apresentado acima, relacionados ao monitoramento das áreas e impactos da exploração seletiva de madeiras, tem-se as seguintes questões para o presente estudo:

- Quais os danos causados pela extração seletiva de madeiras na estrutura das florestas sob concessão federal?
- Como dados LiDAR podem ser utilizados para estimar tais danos? É possível mapear e mensurar estes danos de forma automática?
- Qual a relação entre dados LiDAR e as variáveis biofísicas obtidas a partir de levantamentos em campo obtidas em parcelas permanentes?

### **1.1.2. Objetivo**

Avaliar o uso de dados de LiDAR aerotransportado para identificar e mensurar o dano à floresta remanescente, decorrente da atividade de manejo florestal sustentável, e para estimar a área basal, volume da fuste, e intensidade de exploração aplicada a área.

### **1.1.3. Objetivos específicos**

- Identificar os danos na estrutura da floresta, decorrentes da extração seletiva de madeira.
- Mapear e mensurar o dano a floresta remanescente em áreas de manejo florestal sob concessão federal utilizando dados LiDAR, comparar o mapeamento LiDAR, manual e automatizado, com mapeamento realizado em campo.
- Obter o modelo matemático que relacione dados LiDAR com o volume de fuste e área basal para a Flona do Jamari em Rondônia, a partir de dados de parcelas permanentes medidas em campo.
- Comparar os resultados de intensidade de exploração preditos por dados LiDAR com dados obtidos em campo.

## **1.2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **1.2.1. Manejo florestal sustentável**

De acordo com a Lei de Gestão de Florestas Públicas (BRASIL, 2006), o manejo florestal é considerado como a 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.

Mais de 10% das florestas tropicais do mundo, ou seja, mais de 191 milhões de hectares possuem planos de manejo florestal com fins produtivos (FAO, 2015). Um sistema de manejo envolve atividades relacionadas com os processos de planejamento, colheita de madeira e com os tratamentos silviculturais à floresta remanescente e à regeneração natural garantir as produções futuras. No Brasil os procedimentos para elaboração, apresentação, execução e avaliação de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) estão descritas na Instrução Normativa N.º 5/2006 do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2006).

De acordo com a Norma de Execução N.º 1/2007 do IBAMA (IBAMA, 2007), a execução de um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) pleno pode ser dividida em duas fases, pré-exploratória e exploratória, as atividades contempladas nestas fases são:

- Delimitação e abertura de trilhas: a área a ser explorada é delimitada, bem como as trilhas de orientação são abertas para facilitar a localização das equipes internamente;
- Inventário 100%: Todas as espécies de interesse comercial, que possuem Diâmetro na Altura do Peito (DAP) a partir de 10 centímetros abaixo do diâmetro de corte, são identificadas, localizadas e marcadas em campo;
- Microzoneamento: identificar e localizar áreas de preservação permanente, áreas alagadas, áreas com vegetação singular, de grande importância para a conservação da biodiversidade local, cipóais, tabocais, cursos de água permanentes e temporários (grotas);
- Corte de cipós: Os cipós que possam colocar em risco a segurança dos operários durante a derruba, ou que representem um possível aumento no impacto as árvores remanescentes (cipós entrelaçados a outras árvores próximas a que será derrubada), devem ser suprimidos previamente.

- Seleção de árvores para corte e manutenção: Estabelecer os critérios para categorização das árvores do inventário em, passíveis de corte, remanescentes e outras árvores.
- Instalação de parcelas permanentes: As parcelas devem ser marcadas permanentemente e de maneira a facilitar a sua localização. Nestas parcelas todas as árvores com DAP superior a 10 centímetros são medidas antes da exploração, um ano após a exploração e depois no intervalo de 05 anos;
- Planejamento e construção de estradas e pátios de estocagem: Estas infraestruturas devem ser abertas previamente ao início da exploração e devem otimizar a logística de transporte dentro da área a ser explorada.
- Corte das árvores: O corte deve ocorrer apenas das árvores autorizadas, ele deve ser realizado observando regras de segurança para a equipe de corte e a redução do impacto a floresta remanescente;
- Arraste das toras: Atividade realizada comumente por um trator do tipo Skidder, deve ser executado de maneira a reduzir os impactos causados a floresta remanescente.
- Traçamento: Trata-se do seccionamento da árvore e registro exato das toras derivadas. Deve contemplar a informação da árvore de origem, a identificação e as dimensões da tora;
- Transporte: Deslocamento das toras da floresta para a unidade industrial/consumidora. Deve ser realizado na época seca para evitar danos a infraestrutura e assegurar um transporte eficiente e com baixo custo. É obrigatória a prévia emissão do documento de origem florestal (DOF, SISFLORA, etc.) e o seu porte durante transporte.

### **1.2.2. Danos à floresta remanescente**

No Brasil as normas do Manejo Florestal Sustentável seguem as diretrizes da Exploração de Impacto Reduzido (EIR). A EIR tem por objetivo reduzir os danos da exploração madeireira à floresta remanescente e garantir a recuperação da floresta para novos ciclos de corte, compatibilizando o desenvolvimento econômico e ambiental (HENDRINSON,

1989). Mesmo considerando técnicas de EIR, a exploração florestal implica em um conjunto de operações, compreendendo a derrubada de árvores, o arraste, a construção de estradas, trilhas de arraste e pátio, que reduzem, em primeira instância, a área da cobertura florestal. A dimensão da área aberta por essas atividades dependerá, sobretudo, da intensidade de exploração, do seu planejamento e organização (HENDRINSON, 1989). Diversos estudos buscaram estimar os danos a floresta após exploração seletiva de madeira e comparar os resultados obtidos em áreas que utilizaram técnicas de EIR com técnicas convencionais, que atualmente não são sequer permitidas no Brasil (Tabela 1.1).

**Tabela 1.1.** Dano a floresta remanescente após evento de exploração madeireira, em que: MEX = Método de Exploração, IEX = Intensidade de Exploração, DER = Derrubada e INF = infraestrutura

MEX	IEX (m <sup>3</sup> /ha)	IEX (árv/ha)	Área aberta (%)			Fonte
			DER	INF	Total	
EIR	90,0	12,0	29,0	18,0	47,0	(1)
Convencional	20,8	4,2	37,0	8,0	45,0	(2)
Convencional	16,0	2,0	8,1	5,8	13,9	(3)
Convencional	19,7	8,4	14,0	14,0	28,0	(4)
EIR	18,6	8,5	8,0	6,5	14,5	(4)
Convencional	30,0	5,6	7,8	15,0	22,8	(5)
EIR	37,0	4,5	7,3	7,7	15,0	(5)
EIR	23,0	3,0	-	4,8	-	(6)
Convencional	23,0	3,7	-	8,9	-	(6)
EIR	23,0	3,5	-	4,6	-	(6)
Convencional	23,0	6,4	-	11,2	-	(6)
EIR	-	3,8	-	8,6	-	(7)
Convencional	-	2,6	-	10,5	-	(7)
EIR	-	2,9	-	5,2	-	(7)
Convencional	-	3,1	-	15,3	-	(7)
Convencional	25,0	4,0	-	10,1	-	(8)
EIR	25,0	3,3	-	5,2	-	(8)
EIR	15,0	-	-	-	15,4	(9)
EIR	12,5	-	4,1	-	17,1	(10)

Fontes: (1) Costa et al. (1984); (2) Uhl & Vieira (1988); (3) Veríssimo et al. (1989); (4) Hendrinson (1989); (5) Johns et al. (1996); (6) Pereira et al. (2002); (7) Asner et al. (2004); (8) Lentini et al. (2009); (9) D'Oliveira et al. (2012); (10) Andersen et al. (2013).

Vale ressaltar que dos dez estudos citados na Tabela 1.1, apenas dois utilizaram sensoriamento remoto para mensuração do dano a floresta remanescente, todos os demais demandaram extenso trabalho de campo para sua conclusão.

Dano a floresta remanescente é conceituado pelo Serviço Florestal Brasileiro em seus contratos de concessão florestal (SFB, 2008), como a proporção de área de florestas aberta para a implantação da infraestrutura de exploração, (estradas, trilhas de arraste e pátios) e pela derruba (abertura de clareiras decorrentes da queda das árvores exploradas) em uma Unidade de Produção Anual (UPA). Definição alinhada com os principais estudos que analisaram os danos decorrentes da execução de manejos florestais em florestas tropicais.

### **1.2.3. Serviço Florestal Brasileiro e as Concessões Florestais**

De acordo com o Cadastro Nacional de Florestas Públicas - CNFP, o Brasil possui 311 milhões de hectares de florestas públicas (SFB, 2015). Esse enorme ativo ambiental da sociedade brasileira deve ser protegido para que possa conservar a rica biodiversidade nacional, mas também deve ser visto como fonte de desenvolvimento para o país. Com o objetivo de fomentar o uso sustentável dos recursos florestais do Brasil, foi promulgada em 02 de março de 2006 a Lei de Gestão de Florestas Públicas (BRASIL, 2006), trazendo o instrumento de concessão florestal como uma importante ferramenta para alcançar esse equilíbrio de produção e conservação.

A concessão florestal é uma delegação onerosa, feita pelo poder concedente, do direito de praticar manejo florestal sustentável para exploração de produtos e serviços em área de floresta pública, mediante licitação, à pessoa jurídica, que atenda às exigências do respectivo edital de licitação e demonstre capacidade para seu desempenho, por sua conta e risco e por prazo determinado (BRASIL, 2006). De acordo com Bomfim et al. (2016) a concessão florestal aparece como um instrumento econômico capaz de promover a: geração empregos; aumento de renda e, conseqüentemente, combate à pobreza e à miséria; ampliação de arrecadação; implantação de política de participação nos lucros; capacitação da mão de obra local; acesso à previdência social; investimentos em infraestrutura e serviços para comunidade local e agregação de valor ao produto florestal.

O Serviço Florestal Brasileiro, órgão criado também pela Lei de Gestão de Florestas Públicas, é o responsável pela gestão das concessões florestais nas áreas de florestas

públicas federais. Como gestor das concessões federais, o Serviço Florestal Brasileiro deverá, entre outras atividades, fiscalizar todos os compromissos assumidos pelos concessionários nos contratos de concessão florestal, dentre estes compromissos destaca-se o limite de danos a floresta remanescente após evento de exploração, definido em contrato como, a proporção de área de florestas aberta para a implantação de estradas secundárias, trilhas de arraste, pátios e pela derruba em uma Unidade de Produção Anual. O SFB estabeleceu em seus editais o valor máximo de 8% para os danos decorrentes da abertura de estradas secundárias, trilhas de arraste, pátios e de 10% para os danos decorrentes da derrubada de árvores (SFB, 2008).

Ainda não foi apresentado pelo SFB a metodologia para mensuração dos danos a floresta remanescente que devem ser monitorados nos seis contratos de concessão onde este indicador está presente. Portanto, este estudo pode contribuir na definição de tal metodologia.

#### **1.2.4. O monitoramento da exploração florestal na Amazônia Brasileira**

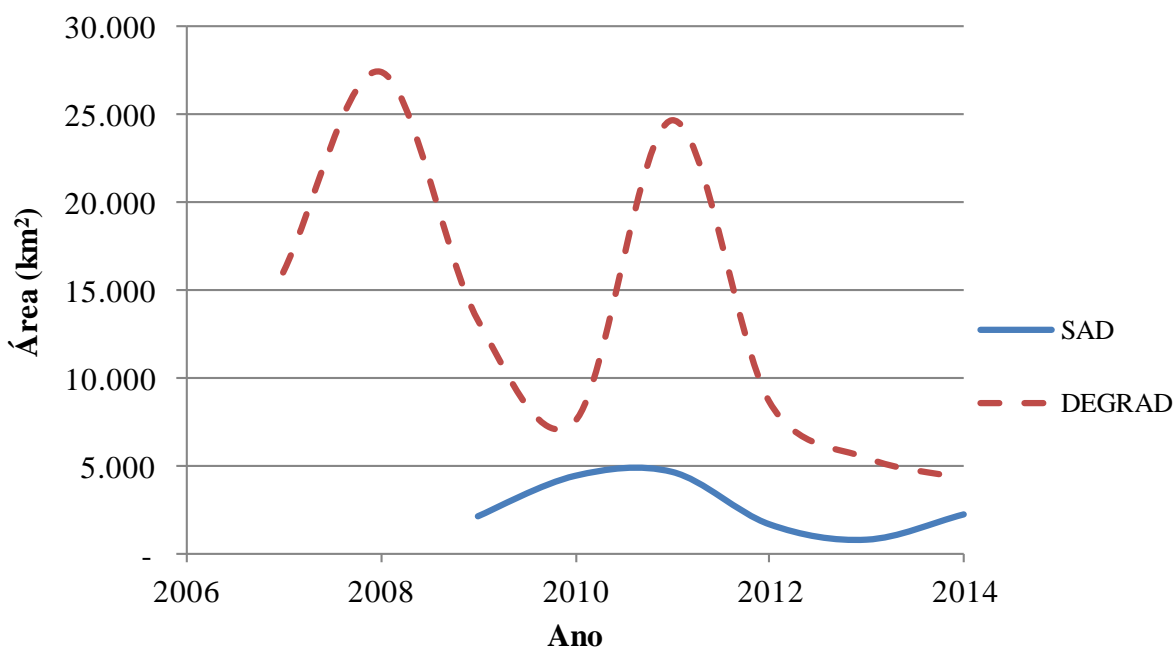
Mapear o corte seletivo, utilizando imagens de satélite ópticas, é mais complexo do que mapear corte raso de uma floresta, uma vez que, após a exploração florestal a maior parte das árvores continua de pé e apenas uma pequena parte das feições características desse tipo de atividade, como estradas e pátios, se destacam na imagem (VERÍSSIMO et al., 1995; UHL et al., 1997; READ, 2003). Vários fatores afetam o sucesso do mapeamento da exploração seletiva: o grau de umidade da estação (em secas prolongadas o dossel da floresta expõe maior quantidade de solo), o tempo decorrido desde a exploração, a intensidade de exploração, entre outros (PINAGÉ & MATRICARDI, 2015). Atualmente os dois principais sistemas de mapeamento da degradação florestal, termo que engloba a perturbação da floresta por fogo e exploração madeireira, em operação no Brasil são o DEGRAD - Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira e o SAD – Sistema de Alerta de Desmatamento.

O sistema DEGRAD, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2016), é voltado para mapear anualmente áreas de floresta degradadas acima de 6,25 hectares, através de imagens de satélites LANDSAT e CBERS. A degradação mapeada

pode apresentar três padrões: a) Degradação de intensidade alta; b) Degradação de intensidade moderada; e c) Degradação de intensidade leve;

O SAD, desenvolvido pelo órgão não governamental IMAZON (IMAZON, 2016), até o ano de 2009 mapeava apenas desmatamento por corte raso, posteriormente passou a adotar áreas de degradação progressiva. Os polígonos de alerta de degradação florestal são gerados a partir de imagens MODIS diárias dos produtos MOD09GQ e MOD09GA para filtragem de nuvens. O produto final do processamento destas imagens tem seus pixels variando de -1 (pixel com 100% de solo exposto) a 1 (pixel com > 90% com vegetação florestal).

A Figura 1.2 apresenta os valores anuais de florestas degradadas na Amazônia Legal, obtidos pelo SAD e DEGRAD. Percebe-se uma grande diferença entre os resultados derivados de cada um deles, o que indica não existir uma metodologia consolidada para mapear a degradação florestal, sendo dessa maneira necessário, testar novos métodos para o monitoramento remoto, considerando outros sensores e diferentes técnicas de processamento.



**Figura 1.2.** Degradação florestal na Amazônia Legal de acordo com os dados do SAD e do DEGRAD.

Existe ainda o Sistema de Detecção da Exploração Seletiva de Madeira (DETEX), desenvolvido pelo INPE em parceria com o SFB, que também é baseado em imagens de

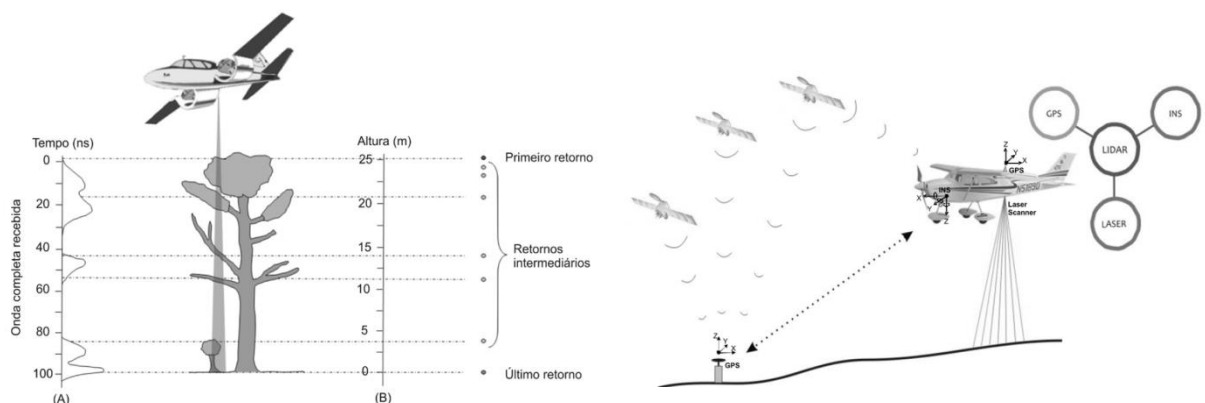


satélite ópticas, mas diferentemente do DEGRAD e do SAD apresenta anualmente apenas dados de exploração seletiva de madeira para a floresta amazônica brasileira. Como estes dados são de uso restrito do Governo Brasileiro não é possível compara-los com os demais sistemas.

### 1.2.5. LiDAR

O perfilamento a laser é considerado um método direto de coleta de dados, trata-se de um sensor ativo. Dessa maneira traz algumas vantagens em relação aos clássicos sensores passivos, pois não depende do sol como fonte de iluminação e a análise dos dados não é prejudicada por sombras (WAGNER et al., 2004).

O princípio do seu funcionamento baseia-se na utilização de um pulso de laser, radiação eletromagnética de ondas curtas (1-10 $\mu$ m), que é disparado na direção da superfície e ao atingi-la parte desse sinal emitido é refletido na direção do sensor, instalado em uma plataforma que pode ser aérea, terrestre ou orbital, com uma elevada frequência de repetição, sensores atuais emitem até 100.000 pulsos laser por segundo. O sensor mede tanto a intensidade do sinal de retorno como o tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno, este tempo é utilizado para calcular a distância sensor-objeto, considerando que o pulso laser se propaga à velocidade da luz. A posição tridimensional do ponto onde o feixe é refletido é determinada com base na distância entre o sensor e a superfície da terra e a orientação do feixe (Figura 1.3.) (BALTSAVIAS, 1999).



**Figura 1.3.** Princípios e componentes de um sistema LiDAR aerotransportado. Fonte: GIONGO et al. (2010)

O registro contínuo das coordenadas espaciais (x, y, Z) dos retornos é feito com extrema precisão, e estes retornos constituem os elementos primários para a formação de uma

nuvem de pontos que descreve o alvo imageado (GIONGO et al., 2010). Os produtos derivados de uma coleta LiDAR podem ser enquadrados em três grandes grupos:

- Modelos Digitais de Elevação (MDE), que representam de maneira contínua a variação do relevo sobre espaço, e podem ser subdivididos em Modelos Digitais de Superfície (MDS), contendo a informação de elevação de todas as feições da paisagem e Modelos Digitais de Terreno (MDT), que contêm informações da superfície da terra, desconsiderando a vegetação ou estruturas construídas pelo homem (JENSEN, 2009). Do ponto de vista florestal, um segundo modelo de superfície é muito importante, o Modelo de Altura do Dossel (*Canopy Height Model* – CHM), onde os valores da coordenada Z do MDS são descontadas do MDT fornecendo uma superfície matricial que descreve a altura de cada feição, como de cada árvore, em relação ao terreno.
- Intensidade, o sensor LiDAR trabalha na faixa do espectro eletromagnético do infravermelho próximo (*Near Infrared* – NIR), dessa maneira é obtida a informação de energia refletida pelo alvo imageado, permitindo a identificação de classes de cobertura do solo. Porém, como o ângulo de reflexão traz muito ruído para esta informação é recomendada a normalização dos dados de intensidade pelo ângulo de reflexão (GONÇALVES & SECO, 2007).
- Métricas estatísticas, são superfícies matriciais contínuas contendo os parâmetros estatísticos (valores máximos, mínimos, variância, percentis, desvio padrão entre outros) que descrevem o conjunto de dados LiDAR, calculadas a partir da nuvem de pontos. Podem ser subdivididas em métricas de altura, densidade e intensidade (USFS, 2014).

Em uma das primeiras aplicações florestais dos dados LiDAR, Nelson et al. (1984) utilizou-os para determinação das características do dossel florestal em uma área no estado da Pensilvânia, desde então a tecnologia LiDAR, em especial de Sistemas LiDAR Aerotransportados (*Airborne LiDAR System* – ALS), vem sendo amplamente utilizada em aplicações florestais, a Tabela 1.2 apresenta algumas das aplicações já testadas.

A coleta de dados LiDAR para aplicações ligadas a florestas densas, como o caso das florestas tropicais brasileiras deve ter uma preocupação especial com a densidade de

pontos da nuvem. Leitold et al. (2015) estudou a influência da redução da densidade de pontos na modelagem do terreno abaixo de uma floresta e nas medições de altura das árvores. A redução da densidade da nuvem para menos de quatro retornos por metro quadrado resultou na subestimação da altura das árvores e por consequência das informações dela derivadas, como a biomassa aérea, demonstrando assim a necessidade de se utilizar densas nuvens de pontos para aplicações em florestas densas.

**Tabela 1.2.** Aplicações florestais de dados LiDAR. Adaptado de Giongo et al. (2010)

<b>Aplicações florestais</b>	<b>Forma de obtenção da informação</b>	<b>Exemplo de aplicação na literatura</b>
Altura dossel	Medida direta	HUNTER et al. (2013)
Volume de copa	Medida direta	COOPS et al. (2007)
Diâmetro da copa	Medida direta	ROBERTS et al. (2005)
Número de indivíduos	Medida direta	HIRATA et al. (2009)
Formação de clareiras	Medida direta	HUNTER et al. (2015)
Volume	Modelagem	FIGUEIREDO et al. (2014)
Biomassa	Modelagem	D'OLIVEIRA et al. (2012)
Carbono	Modelagem	ASNER & MASCARO (2014)
Área basal	Modelagem	D'OLIVEIRA et al. (2012)
Diâmetro a Altura do Peito (DAP)	Modelagem	YAO et al. (2012)
Material combustível aéreo	Modelagem	ANDERSEN et al. (2005)
Impacto da exploração madeireira	Modelagem	ANDERSEN et al. (2013)
Iluminação no sub-bosque	Modelagem	ALEXANDER et al. (2013)
Cobertura de copa	Fusão com outros sensores	NELSON et al. (1984)
Identificação de espécies	Fusão com outros sensores	DANDOIS & ELLI (2013)

### **1.2.6. Estimativas biométricas da floresta utilizando LiDAR**

O sensoriamento remoto pode ser utilizado para obtenção de uma série de informações florestais, e a aplicação da tecnologia LiDAR para estimativa de parâmetros biométricos da floresta tem se mostrado eficiente (D'OLIVEIRA et al., 2012; YAO et al., 2012; FIGUEIREDO et al., 2014). Tradicionalmente, correlações entre as métricas derivadas da nuvem de pontos LiDAR e dados de campo são consideradas para construção de modelos como de biomassa e estoque de carbono acima do solo, volume, área basal, índice de área foliar (LAI) entre outros.

Pesquisas utilizando LiDAR para estimativa da biomassa aérea em florestas tem aumentado nos últimos anos. Em especial porque a biomassa florestal aérea é considerada uma variável primária nos estudos de ciclo de carbono de ecossistemas terrestres, e é também considerada uma variável essencial nos estudos do clima, e pelo fato da tecnologia LiDAR permitir, de maneira rápida, boas estimativas deste parâmetro. Para florestas uniformes, como as coníferas presentes no hemisfério norte, ou as florestas plantadas, a capacidade de explicação da biomassa através de dados LiDAR tem facilmente superado 85% (LEFSKY et al., 2002; NÆSSET, 2004; JENSEN et al., 2008; ZONETE et al., 2010). Para as florestas tropicais, devido a sua maior heterogeneidade, essa capacidade de prever biomassa através de dados LiDAR é um pouco inferior, poder de explicação próximo a 77% (D'OLIVEIRA et al., 2012; ELLI et al., 2016).

Numa linha mais ligada a produção florestal, esforços para a estimativa do volume de madeira utilizando LiDAR também vêm sendo realizados e obtendo bons resultados em áreas de florestas plantadas, modelos com capacidade de explicação da ordem de 80% (OLIVEIRA et al., 2014; CARVALHO et al. 2015). Em áreas de floresta tropical, destinadas ao manejo florestal sustentável, a quantidade de estudos é menor e a capacidade de predição de volume levemente inferior, em torno de 70%. (D'OLIVEIRA et al., 2012).

### **1.3.VISÃO GERAL DA PESQUISA**

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos para cobrir todas as questões de pesquisa citadas anteriormente. O Capítulo I apresenta o desenho experimental e descreve, de maneira geral, o desenvolvimento científico do estudo. Capítulo II é focado no desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento visual do impacto do manejo florestal sustentável a floresta remanescente e testes para realização do mapeamento de maneira automatizada, utilizando dados provenientes de sistema LiDAR aerotransportado. No Capítulo III, é desenvolvida e testada a modelagem de área basal e volume de fuste para algumas áreas de concessão florestal também utilizando dados LiDAR. Por último o Capítulo IV, revisita as questões de pesquisa deste estudo, compila as principais conclusões e sugere questões para estudos futuros.

## **2. MAPEAMENTO E MENSURAÇÃO DOS IMPACTOS DA EXPLORAÇÃO SELETIVA DE MADEIRAS EM ÁREAS DE CONCESSÃO FLORESTAL NA AMAZÔNIA**

### **2.1. RESUMO**

O Manejo Florestal Sustentável pode ser considerado importante componente para uma estratégia de conservação e sequestro de carbono em florestas tropicais, porém seu adequado monitoramento é de difícil operacionalização. O mapeamento das áreas afetadas pela exploração seletiva de madeira e a mensuração do dano à floresta remanescente ainda são dependentes de extensos levantamentos de campo. Neste estudo foi utilizada a tecnologia LiDAR aerotransportada para realização deste monitoramento, 21 Unidades de Produção Anual, tiveram sua exploração madeireira mapeada e o dano à floresta remanescente medido. Estas áreas estão distribuídas nos estados de Rondônia e do Pará, em Florestas Nacionais sob regime de concessão florestal federal.

O dano a floresta remanescente foi analisado separadamente para dois diferentes estratos, no dossel, decorrente da derrubada de árvores e consequente abertura de clareiras e dano no sub-bosque, decorrente da abertura de estradas, de trilhas de arrastes e da construção de pátios. Para o mapeamento do dano foram utilizadas duas métricas derivadas da nuvem de pontos LiDAR, para o dossel a métrica de *Canopy Height Model* (CHM) e para sub-bosque a métrica de *Relative Density Model* (RDM).

Os resultados de danos à floresta nativa obtidos com o mapeamento LiDAR apresentam relação direta com o mapeamento realizado em campo. Os resultados deste estudo indicam que as práticas de Exploração Florestal de Impacto Reduzido causam danos no sub-bosque na ordem de  $6,8\% \pm 1,3\%$  da área total da UPAs avaliadas e a área de clareiras de  $7,8\% \pm 1,4\%$ . Os danos no sub-bosque causado pela exploração seletiva de madeiras pode ser detectado a partir de classificação automática da métrica RDM, reduzindo consideravelmente o tempo para detecção dos referidos impactos no sub-bosque, com acurácia espacial compatível ao mapeamento de campo, superestimando 2,3 vezes o mapeamento manual dos mesmos danos.

A tecnologia LiDAR demonstrou ser efetiva e completa para o monitoramento dos impactos da exploração seletiva de madeiras em áreas sob concessão florestal federal na Amazônia.

## **2.2.INTRODUÇÃO**

O mapeamento da exploração seletiva de madeiras na Amazônia, utilizando imagens de satélites ópticas, tem sido realizado a vários anos. Muitos estudos demonstraram a capacidade de sensores ópticos de média resolução espacial em estimar a área explorada e a intensidade da exploração (ASNER et al, 2005; SOUZA et al., 2005; MATRICARDI et al., 2013). No entanto, os mapeamentos baseados em produtos de média resolução espacial não apresentam estimativas precisas das áreas alteradas e seus impactos. Um exemplo da dificuldade de mapeamento da degradação florestal é revelado pela divergência dos valores estimados pelos sistemas de detecção de degradação florestal que operam na Amazônia brasileira, o DEGRAD, administrado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mapeou em 2014 uma área 4.258km<sup>2</sup>, enquanto o Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD), desenvolvido e operado pela Organização Não Governamental IMAZON, identificou 2.213km<sup>2</sup> de floresta degradada no mesmo ano (INPE, 2016; IMAZON, 2016).

Considerando o alto potencial da Amazônia para a economia florestal, é necessário o aprimoramento de técnicas e sistemas para monitorar adequadamente sua exploração florestal com objetivo de reduzir a ilegalidade no setor, assegurando benefícios econômicos, sociais e ambientais do manejo florestal. Além disso, um manejo florestal mal executado pode comprometer a capacidade de recuperação do estoque comercial de madeira da floresta, além de causar uma série de impactos ambientais como, distúrbios no solo, redução da qualidade da água, da biodiversidade e dos estoques de carbono. (HENDRINSON, 1989; MERRY et al., 2009; NEPSTAD et al., 1999; PUTZ et al., 2012).

As técnicas de Exploração de Impacto Reduzido (EIR) podem reduzir de 25 a 33% dos danos na floresta comparado com a exploração de madeiras de forma convencional (JOHNS et al., 1996). Os danos decorrentes de uma exploração florestal são de difícil mensuração, pois podem ocorrer tanto no dossel, devido a abertura de clareiras, quanto no sub-bosque, em função da abertura de estradas, trilhas e pátios. A maioria dos estudos realizados em florestas tropicais com objetivo de mensurar os danos decorrentes do manejo

florestal, se mostraram dependentes de extensos e onerosos trabalhos de campo (ASNER et al., 2004; LENTINI et al., 2009).

O uso de tecnologia de sensoriamento remoto tem a capacidade de alavancar a mensuração dos danos de exploração florestal na Amazônia. Porém, imagens de satélite ópticas são limitadas na sua capacidade de identificar alteração no sub-bosque florestal (COOPS et al., 2007). O Sistema LiDAR Aerotransportado (*Airborne LiDAR System – ALS*) é uma tecnologia que tem a capacidade de obter informações de todo o perfil vertical da vegetação, incluindo informações do sub-bosque (JENSEN, 2009). O LiDAR vem sendo testado em inúmeras aplicações florestais, como por exemplo, estimativa de crescimento, quantificação de biomassa e estoques de carbono (NÆSSET & GOBAKKEN, 2005; ASNER et al., 2011; GIANNICO et al., 2016) e em estudos sobre degradação em florestas tropicais (D’OLIVEIRA et al., 2012; ANDERSEN et al., 2013; ELLI et al., 2016).

O princípio de funcionamento do LiDAR é baseado na utilização de um pulso de laser, disparado na direção da superfície com uma elevada frequência de repetição. Baseado no tempo de retorno, na posição do sensor e na orientação do raio é calculada a posição tridimensional do objeto (BALTSAVIAS, 1999). Sensores LiDAR de alta frequência conseguem gerar uma densa nuvem de pontos, em três dimensões, descrevendo com elevado grau de detalhes a estrutura do objeto imageado (GIONGO et al., 2010). Os produtos do LiDAR, entretanto, ainda precisam ser melhor investigados e avaliados em aplicações voltadas ao monitoramento de impactos em florestas tropicais.

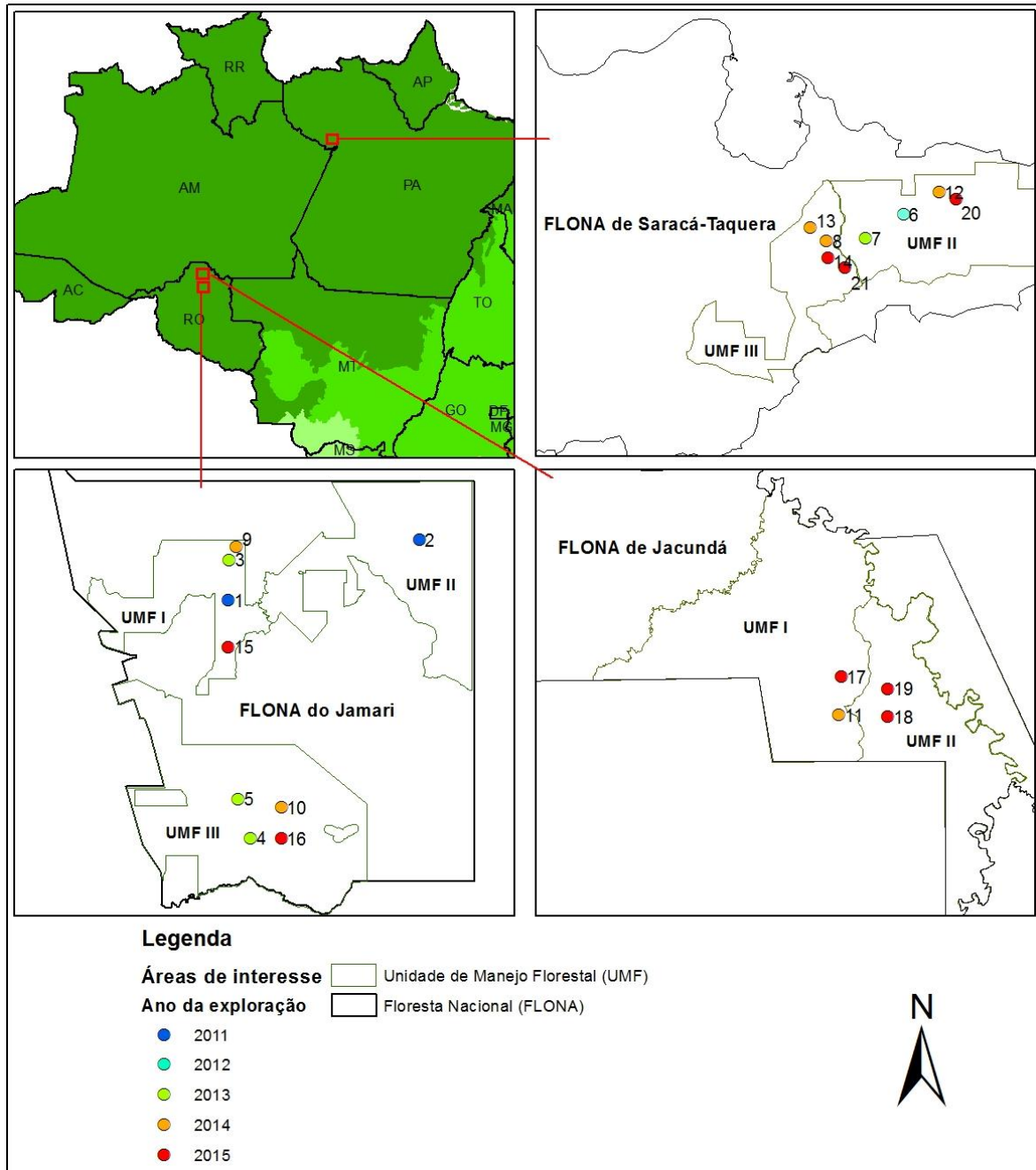
O presente trabalho de pesquisa tem como objetivos (1) mapear e mensurar o dano a floresta remanescente após evento de Manejo Florestal Sustentável utilizando dados LiDAR; (2) validar, com dados de campo, o mapeamento de danos obtido com LiDAR.

## **2.3.MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.3.1. Área de estudo**

Á área deste estudo incluiu as Florestas Nacionais (Flona) do Jamari e Jacundá, localizadas no estado de Rondônia, a Flona de Saracá-Taquera, localizada no estado do Pará, todas em regime de concessão florestal do Serviço Florestal Brasileiro. Dentro destas Flonas foram conduzidas amostras de dados LiDAR de 21 Unidades de Produção Anual (UPA) exploradas seletivamente. A localização de cada uma das áreas de interesse deste estudo é

apresentada na Figura 2.1, sendo nove localizadas na Floresta Nacional do Jamari/RO, oito na Floresta Nacional de Saracá-Taquera/PA e quatro na Floresta Nacional do Jacundá/RO.



**Figura 2.1.** Localização da área de estudo e das 21 amostras de dados LiDAR em áreas florestais exploradas seletivamente

Mais detalhes das áreas de interesse são apresentados na Tabela 2.1, incluindo alguns dos parâmetros do manejo florestal realizado em cada uma delas. Cinco das 21 áreas avaliadas foram imageadas com o sensor LiDAR antes e após a exploração seletiva de madeiras.



A Flona do Jamari, criada em 1984, está situada nos municípios de Itapuã do Oeste, Cujubim e Candeias do Jamari, no estado de Rondônia, abrangendo uma área total de 220 mil hectares. Segundo a classificação fisionômica-ecológica do IBGE (2012), é predominantemente coberta por Floresta Ombrófila Densa, com algumas porções de Floresta Ombrófila Aberta, com predominância de palmeiras ou com cipós. Em 2008 o Serviço Florestal Brasileiro concedeu 96 mil hectares da Flona do Jamari para exploração florestal, divididos em três Unidades de Manejo Florestal (UMF). No mês de setembro de 2010 foi iniciada a exploração nas primeiras Unidades de Produção Anual (UPA).

**Tabela 2.1.** Dados detalhados das áreas de interesse. JAM = Floresta Nacional do Jamari/RO; FST = Floresta Nacional de Saracá-Taquera/PA; JAC = Floresta Nacional do Jacundá/RO.

Código da área	Flona	Área total UPA (ha)	Cobertura LiDAR (ha)	Exploração (árvores/ha)	Exploração (m <sup>3</sup> /ha)	Ano exploração	Coleta LiDAR
01	JAM	594,3	102,8	2,1	15,8	2011	2011
02	JAM	1.069,2	299,7	1,1	10,1	2011	2011
03	JAM	591,3	550,4	1,8	12,6	2013	2013
04	JAM	1.946,1	228,6	1,6	14,4	2013	2014
05	JAM	1.943,6	218,4	1,1	10,4	2013	2014
06	FST	1.025,4	737,0	3,4	21,1	2012	2013
07	FST	971,4	183,8	2,3	12,9	2013	2014
08	FST	615,5	101,1	3,2	17,4	2013	2014
09*	JAM	622,3	124,8	2,8	19,3	2014	2013/2014
10	JAM	1.780,0	188,9	1,3	11,5	2014	2014
11	JAC	1.931,6	298,6	1,5	11,5	2014	2015
12	FST	1.375,8	174,7	2,7	15,6	2014	2014
13	FST	603,5	108,6	2,2	12,9	2014	2014
14*	FST	794,0	239,1	3,9	18,9	2014	2014/2015
15*	JAM	496,1	124,6	2,5	19,2	2015	2014/2015
16*	JAM	1.926,7	187,0	1,9	12,6	2015	2014/2015
17	JAC	2.256,1	137,1	1,7	12,1	2015	2015
18	JAC	1.250,0	174,1	1,3	11,9	2015	2015
19	JAC	1.263,0	173,8	1,6	11,7	2015	2015
20*	FST	1.047,1	160,6	2,6	19,5	2015	2014/2015
21	FST	611,5	84,9	4,1	20,2	2015	2015
<b>Média ±</b>		<b>1.176,9</b>	<b>219,0</b>	<b>2,2</b>	<b>14,8</b>		
<b>Desvio Padrão</b>		<b>± 572,2</b>	<b>± 155,9</b>	<b>± 0,9</b>	<b>± 3,6</b>		

\* Parcelas amostradas com dados LiDAR antes e após a exploração florestal.

A Flona de Saracá-Taquera foi criada em 1989, está situada nos municípios de Oriximiná, Faro e Terra Santa, no estado do Pará. Tem uma área aproximada de 441 mil hectares e, segundo a classificação fisionômica-ecológica do IBGE (2012), é predominantemente coberta por Floresta Ombrófila Densa, Formações Pioneiras com influência fluvial e Campinarana. Em 2009 o Serviço Florestal Brasileiro concedeu 48,8 mil hectares da área para exploração florestal, divididos em duas Unidades de Manejo Florestal. No mês de setembro de 2012 foi iniciada a exploração na primeira Unidade de Produção Anual.

A Flona do Jacundá, criada em 2004, está situada nos municípios de Porto Velho e Candeias do Jamari, no estado de Rondônia. Tem área de 220 mil hectares e, segundo a classificação fisionômica-ecológica do IBGE (2012), é coberta predominantemente por Floresta Ombrófila Aberta, com porções de Floresta Ombrófila Densa e Contatos Savana/Floresta, Savana Parque e Savana Florestada. Em 2013 o Serviço Florestal Brasileiro concedeu 88 mil hectares da Flona do Jacundá para exploração florestal, divididos em duas Unidades de Manejo Florestal. No mês de junho de 2014 foi iniciada a exploração nas primeiras Unidades de Produção Anual.

### **2.3.2. Dados utilizados**

O conjunto de dados LiDAR utilizados neste estudo foram coletados nos anos de 2011, 2013, 2014 e 2015 (Tabela 2.2). Os dados foram disponibilizados na forma de nuvem de pontos, com extensão \*.las, e acompanhados do Modelo Digital do Terreno (MDT) dela derivado, com um metro de resolução espacial. A projeção e sistema de referência adotados para Flona Jamari e de Jacundá foram a UTM, fuso 20 S e Datum SIRGAS 2000. Para a Flona de Saracá-Taquera, UTM, fuso 21 S e Datum SIRGAS 2000.

A partir do levantamento de campo realizado pela empresa concessionária, foram coletadas, para algumas áreas de interesse, informações da infraestrutura de exploração florestal utilizando equipamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de navegação. Estes dados de campo foram exportados do equipamento GNSS no formato vetorial *shapefile* identificados como trilhas de arraste, estradas e pátios. Medidas de largura de cada uma destas estruturas foram coletadas em campo com trena, de maneira aleatória.

Os dados referentes ao Inventário 100%, realizado para cada uma das Unidades de Produção Anual (UPA) exploradas, foram produzidos pelas empresas concessionárias obedecendo as diretrizes técnicas para apresentação de Plano de Manejo Florestal

Sustentável e Plano Operacional Anual, contidas na Norma de Execução N.º 1/2007 do IBAMA (IBAMA, 2007). Esses dados foram disponibilizados em formato de planilha eletrônica \*.xls e arquivo vetorial \*.shp.

O dado volumétrico da madeira explorada para cada uma das UPAs foi gerado pelos concessionários após a exploração da área. A medição (cubagem) das toras segue o Guia para Medição de Produtos e Subprodutos Florestais Madeireiros das Concessões Florestais (SFB, 2012). Estes dados são registrados no Sistema de Cadeia de Custódia pelas empresas concessionárias, e foram exportados do sistema para planilhas eletrônicas \*.xls.

**Tabela 2.2.** Especificação técnica e custo das coletas de dados LiDAR

<b>Especificações</b>	<b>Coleta 2011</b>	<b>Coleta 2013</b>	<b>Coleta 2014</b>	<b>Coleta 2015</b>
Sensor LiDAR	LaserScan, Optech 3100	Optech, Orion	Trimble, Harrier 68i	LaserScan, Optech 3100
Mês da coleta	Nov.	Set./Out.	Out.	Set./Out.
Altitude voo	850 m	850 m	500 m	700 m
Ângulo de escaneamento	11°	11°	15°	15°
Frequência de escaneamento	59.8 kHz	67.5 kHz	360 kHz	55 kHz
Sobreposição lateral	65%	65%	65%	70%
Densidade média de retornos	25,8 ppm <sup>2</sup>	32,9 ppm <sup>2</sup>	49,6 ppm <sup>2</sup>	59,2 ppm <sup>2</sup>
Custo (R\$)	49,67/ha	42,00/ha	58,05/ha	47,50/ha

### **2.3.3. Processamento dos dados**

#### **2.3.3.1. Processamento LiDAR**

O processamento das nuvens de pontos e dos modelos de terreno foi executado no pacote FUSION (McGAUGHEY, 2010), e o processamento das métricas derivadas realizado no pacote ArcGIS (ESRI, 2012). Os arquivos do MDT foram convertidos do formato grid para o formato \*.ascii e em seguida, para o formato \*.dtm, nativo do pacote FUSION. A altitude do terreno derivada do MDT é subtraída de cada retorno para remover o efeito da topografia (relevo) sobre a altura da floresta.

O processador LTK Processor do FUSION foi utilizado para processar o conjunto de múltiplos *tiles*<sup>3</sup> (no formato \*.las) de cada área de estudo. O resultado de cada processamento do LTK consiste em um conjunto de superfícies matriciais em resolução espacial definida pelo usuário, contendo métricas de densidade, elevação e intensidade (McGAUGHEY, 2010).

#### 2.3.3.2. Mapeamento do dano no sub-bosque

A métrica LiDAR intitulada *Relative Density Model* (RDM) foi utilizada em diversos estudos que tinham por objetivo detectar a infraestrutura de exploração presente no sub-bosque de florestas tropicais manejadas (D'OLIVEIRA et al., 2012, ANDERSEN et al., 2013; PINAGÉ & LOCKS, 2014; ELLI et al. 2016). Esta métrica consiste no cálculo da densidade de retornos LiDAR em uma dada faixa do estrato vertical da floresta. No caso deste estudo, foi adotado o extrato de 1 a 5 metros de altura (Figura 2.5), pois é capaz de representar os “túneis” criados pelo trânsito de maquinário durante o arraste de toras no interior da floresta.

#### **Classificação visual**

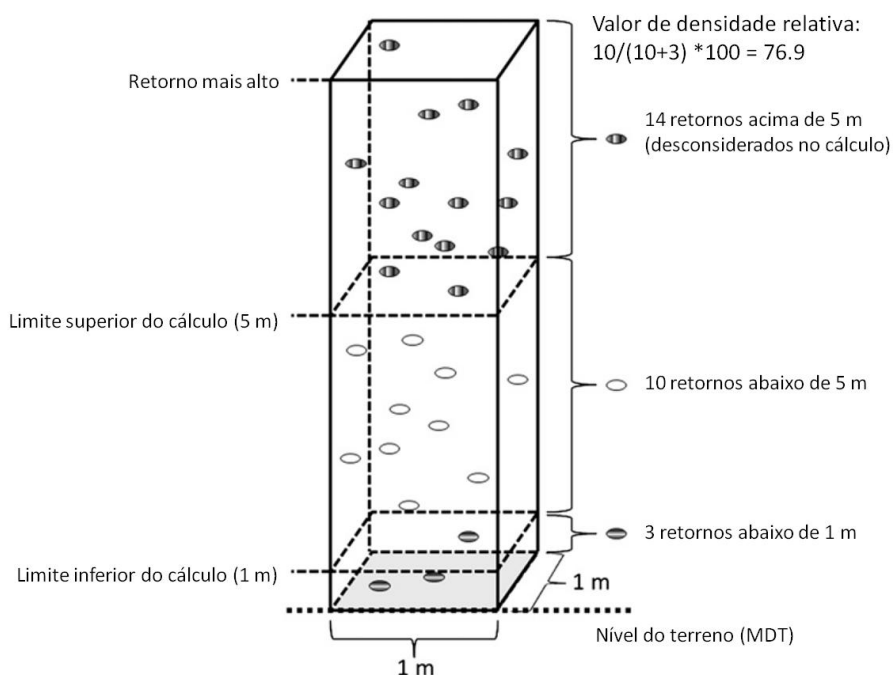
A partir das imagens com a métrica RDM, geradas com resolução espacial de 1 metro, foram digitalizadas manualmente na tela de um computador todas as trilhas de arraste e estradas, em formato vetorial (linha), e no formato vetorial (polígono) todos os pátios de estocagem de cada uma das 21 áreas de interesse (4.600 hectares) deste estudo. Para diferenciar a rede de estradas das trilhas de arraste, foram digitalizadas as estradas utilizando como apoio a rede de estradas planejada pela empresa concessionária e aprovada pelo IBAMA. O processo de digitalização foi feito utilizando o programa ArcGIS, na tela de um computador, em escala variável, respeitando o limite da resolução espacial das imagens. As informações de campo obtidas com GNSS não foram consultadas durante a digitalização.

A digitalização manual foi adotada tomando como referência Elli et al. (2016), que observou as seguintes vantagens deste método: (1) intérpretes humanos são particularmente capazes de combinar uma grande variedade de informações espaciais

---

<sup>3</sup> *Tiles*, que em português significa azulejos, é a maneira utilizada para dividir uma nuvem de pontos em blocos menores e assim otimizar o processamento computacional da mesma. Neste estudo os *tiles* possuem 1000x1000m.

fragmentadas, agrupando estas feições dentro de um padrão linear que tenha significado;  
 (2) falsos sinais de exploração no RDM podem ser facilmente identificados com a consulta ao MDT da área.



**Figura 2.2.** Representação gráfica da estimativa do valor de densidade relativa para cada célula. Fonte: D'OLIVEIRA et al. (2012). Altos valores de RDM sugerem uma área com sub-bosque não alterado, valores próximos de zero indicam danos no sub-bosque. É possível que ocorram células sem informação (*no data*), que indicam um dossel denso, capaz de impedir a penetração de feixes laser e a geração de retornos próximos ao terreno.

A área de floresta impactada foi estimada a partir da aplicação da largura média das infraestruturas, obtidas em campo, utilizando a ferramenta *buffer* do ArcGIS, nas feições de estradas e trilhas de arraste digitalizadas sobre a métrica de RDM. Os valores médios de largura para as infraestruturas obtidos em campo foram de 3,6 metros para as trilhas de arraste, 5,6 metros para estradas secundárias e 8,7 metros para estradas primárias. O resultado deste processamento foi o mapa de danos no sub-bosque florestal.

### Classificação automática

Os impactos da infraestrutura na floresta também foram estimados a partir de técnicas automáticas de classificação do RDM. Para isso, foi utilizado a ferramenta *reclassify* do ArcGIS, com um limiar de 5% (*pixels* com densidade inferior a 5% foram classificados como de baixa densidade de sub-bosque). A imagem reclassificada com o limiar 5% foi submetida a uma rotina de agrupamento, utilizando a ferramenta *Clump* do ERDAS

IMAGINE®, com janela de 4x4 células. Na sequência, os agrupamentos com tamanho inferior a 100 células foram então removidos com a ferramenta *Sieve Table*. Finalmente foi aplicado um filtro passa-baixa para suavizar o contorno dos polígonos de dano no sub-bosque. O resultado deste processamento foi o mapa automatizado de impactos no sub-bosque florestal.

#### 2.3.3.3. Validação do mapeamento dos impactos no sub-bosque

Para validar o mapeamento manual dos danos causados no sub-bosque florestal utilizando dados do LiDAR, foi realizada a comparação com dados de campo obtidos usando GNSS de navegação modelo Garmin 76CSX. Foi comparada a quantidade, em metros lineares, de trilhas de arrastes e estradas, além da quantidade de pátios. Para avaliar a acurácia do mapeamento sobre o LiDAR, foi calculada a quantidade percentual de trilhas de arraste, estradas e pátios interceptados (ferramenta *intersect* do ArcGIS) por zonas obtidas a partir da projeção horizontal de 5, 10 e 20 metros (ferramenta *buffer* do ArcGIS) das feições obtidas em campo, com auxílio de GNSS (GOODCHILD & HUNTER, 1997).

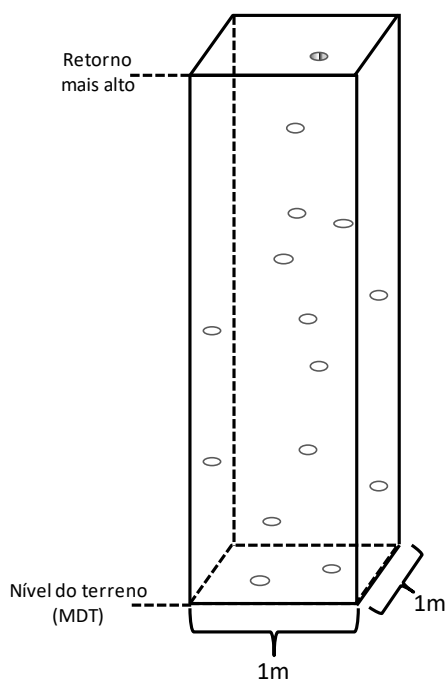
Para validar o mapeamento automático foi feita a comparação com dados de campo obtidos usando GNSS de navegação modelo Garmin 76CSX e com os dados do mapeamento manual dos danos causados no sub-bosque florestal utilizando dados do LiDAR. A acurácia do mapeamento automático foi estimada pela quantidade percentual de trilhas de arraste, estradas e pátios interceptados (ferramenta *intersect* do ArcGIS) por zonas obtidas a partir da projeção horizontal de 5, 10 e 20 metros (ferramenta *buffer* do ArcGIS) das poligonais de dano obtidas automaticamente dos dados LiDAR. Também foi comparado o valor de dano total obtido através do mapeamento manual e automático, e quantificada sua sobreposição.

No presente trabalho foi considerado a quantidade de erros de comissão e de omissão entre os mapeamentos derivados de dados LiDAR e o mapeamento de campo realizado com GNSS de navegação como um indicador de semelhança entre eles.

#### 2.3.3.4. Mapeamento de clareiras

Para mensurar a quantidade de clareiras em uma área objeto de manejo florestal sustentável, foi utilizada a métrica do Modelo de Altura do Dossel (*Canopy Height Model* – CHM). Esta métrica foi gerada a partir do retorno de maior altura da nuvem de pontos

para cada célula de resolução espacial de 1 metro, Figura 2.3. Esta mesma métrica foi utilizada em análise similar realizada por Andersen et al. (2013) na Floresta Estadual do Antimary no Estado do Acre. A partir do CHM foram identificadas as áreas de clareiras, que de acordo com a Hunter et al. (2015), são áreas contíguas com altura inferior a 10 metros e área superior a 10 metros quadrados. O modelo de dossel foi reclassificado e vetorizado para separar os polígonos que atendessem aos dois critérios da definição de clareiras. Em seguida, foi estimada a área de clareiras por hectare para cada uma das áreas de interesse.



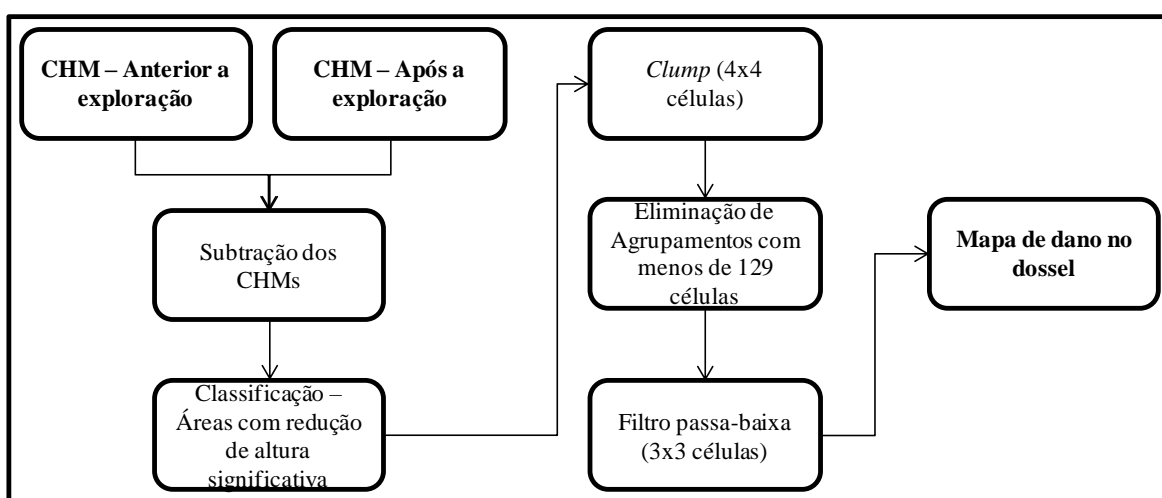
**Figura 2.3.** Representação gráfica da geração do Modelo de Altura do Dossel.

Para cinco das vinte e uma áreas de interesse o procedimento de detecção de clareiras foram utilizados os dados LiDAR coletados antes e após a exploração florestal. Dessa maneira além da informação de clareiras após a exploração, foi obtida a informação da quantidade de clareiras naturais por hectare para cada uma destas áreas. Subtraindo a quantidade de clareiras naturais da quantidade de clareiras identificadas após a exploração foi encontrada a real quantidade de clareiras originadas pela exploração florestal.

#### 2.3.3.5. Mapeamento do dano no dossel

Para mapear os impactos decorrentes da derrubada das árvores, foi feita a subtração (ferramenta *raster calculator* do ArcGIS) entre as métrica do Modelo de Altura do Dossel (*Canopy Height Model* – CHM) derivados das nuvens de ponto LiDAR obtidas antes e

após a exploração. Esta subtração deu origem a uma imagem diferença que foi então processada utilizando o software ERDAS IMAGINE®. A rotina de processamento começou com a classificação da imagem, uma classe representando a área que não sofreu alteração de altura significativa, redução de menos de 2 metros, e outra representando a área que sofreu redução de mais de 2 metros de altura. Para eliminar os ruídos presentes na imagem classificada foi utilizada a ferramenta *Clump*, com janela de 4x4 células. Na sequência, os agrupamentos com tamanho inferior a 129 células foram então removidos utilizando a ferramenta *Sieve Table*. Finalmente foi aplicado um filtro passa-baixa para suavizar o contorno dos polígonos de dano no dossel. O fluxograma da técnica de processamento utilizada pode ser visualizado na Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Fluxograma para o mapeamento automático dos impactos da exploração seletiva no dossel florestal.

#### 2.3.3.6. Validação do mapeamento de dano no dossel

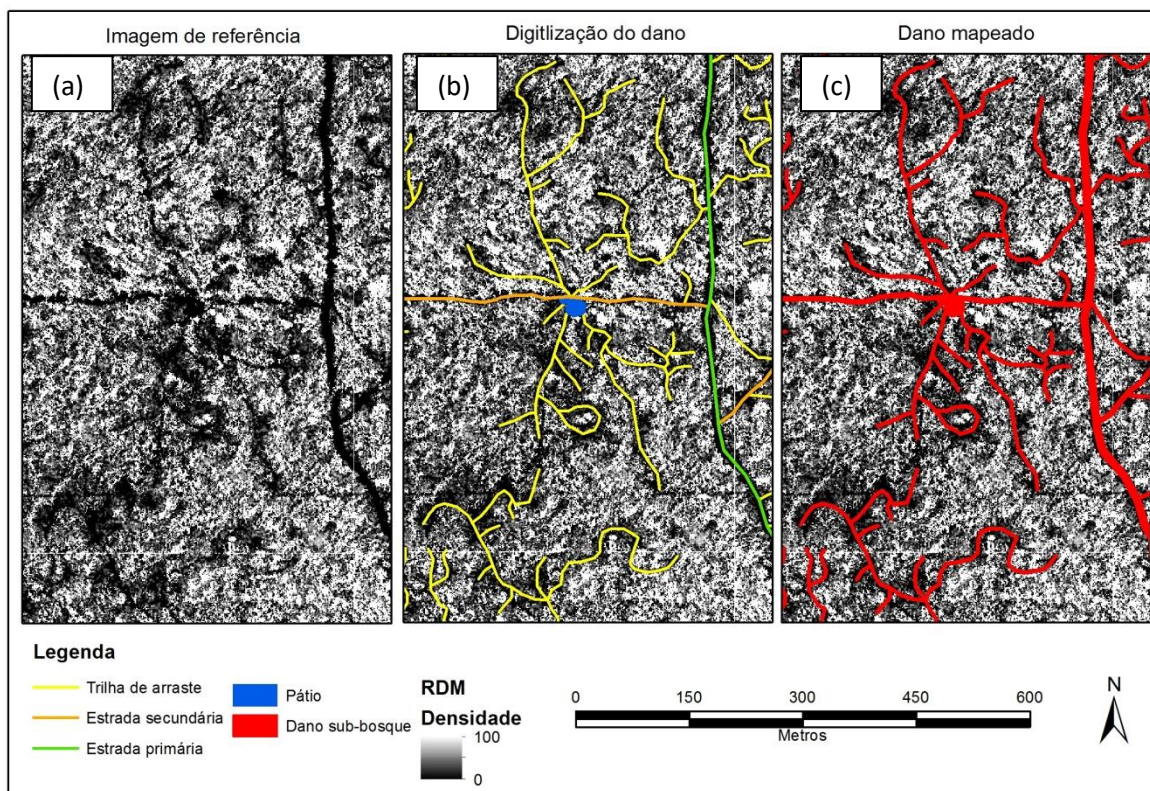
Para validar o mapeamento dos danos causados no dossel florestal utilizando LiDAR, os dados da classificação automática foram comparados com os dados de campo georreferenciados de todas as árvores abatidas nas áreas de interesse. Esta informação foi obtida do Inventário Florestal comercial - IF100%, elaborado pelas empresas concessionárias para compor seu Plano de Operação Anual – POA. Foi analisada a quantidade de árvores abatidas interceptadas (ferramenta *intersect* do ArcGIS) em diferentes zonas de projeção horizontal de 5, 10 e 20 metros (ferramenta *buffer* do ArcGIS) das clareiras identificadas nos dados LiDAR. No presente estudo, foram considerados os erros de comissão e de omissão entre os dois mapeamentos como um indicador de semelhança entre eles, não assumindo acurácia dos dados de GNSS ou LiDAR.



## 2.4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.4.1. Mapeamento do dano no sub-bosque

O padrão de exploração seletiva de madeiras na área de estudo, com estradas interligando pátio de estocagem, por sua vez irradiando trilhas de arraste pode ser observado na Figura 2.5(a). Os tons da imagem RDM representam em cores mais escuras, valores de baixa densidade relativa, os locais onde há escassez de alvos (neste caso vegetação), capazes de interagir com os pulsos lasers e gerarem retornos. As tonalidades mais escuras destacam tanto áreas com sub-bosque naturalmente mais aberto quanto as áreas impactadas pela exploração florestal. As áreas com *pixels* de maiores valores (cores mais claras) e de maior densidade relativa são os locais onde ocorreram maior interação entre os pulsos lasers e a vegetação, gerando maior quantidade de retornos. No presente estudo, tais áreas foram consideradas como não alteradas pela exploração seletiva de madeiras.



**Figura 2.5.** Imagens LiDAR utilizadas para o mapeamento dos impactos no sub-bosque florestal utilizando LiDAR. (a) a métrica de RDM destaca o sub-bosque alterado, (b) cada uma das infraestruturas de exploração é digitalizada, (c) com base nas larguras médias, obtidas em campo, é realizada a extrapolação (*buffer*) para determinar a área impactada. Área 03, Flona do Jamari/RO.

As áreas detectadas pela digitalização visual da infraestrutura utilizando dados LiDAR (Tabela 2.3), são compatíveis com os dados de infraestrutura obtidos a partir de mensuração em campo. A quantidade média de trilhas de arraste detectada nas imagens foi de  $133,8 \pm 32,5$  metros por hectare, Elli et al. (2016) identificou valor ligeiramente superior,  $175 \pm 32$  metros por hectare, porém a intensidade média de exploração em suas áreas de estudo, onde também foram utilizadas técnicas de impacto reduzido, foi de  $37 \pm 9$   $m^3/ha$ , ou seja, mais que o dobro das áreas avaliadas no presente estudo ( $14,8 \pm 3,6$   $m^3/ha$ ).

**Tabela 2.3.** Estimativa da infraestrutura de exploração florestal presente no sub-bosque para cada uma das áreas de interesse a partir de dados LiDAR e interpretação visual. Tri arra. = Trilha de arraste; Estr. sec. = Estrada secundária; Estr. pri. = Estrada primária.

Código da área	Tri. arra. (m/ha)	Tri. arra. (m/m <sup>3</sup> )	Estr. sec. (m/ha)	Estr. sec. (m/m <sup>3</sup> )	Estr. pri. (m/ha)	Estr. pri. (m/m <sup>3</sup> )	Pátio (m <sup>2</sup> /ha)	Pátio (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
01	131,0	8,3	19,9	1,3	10,1	0,6	47,4	3,0
02	67,6	6,7	10,9	1,1	4,0	0,4	32,1	3,2
03	123,6	9,8	20,5	1,6	2,9	0,2	54,1	4,3
04	101,4	7,0	20,2	1,4	6,2	0,4	21,0	1,5
05	107,7	10,4	18,7	1,8	4,5	0,4	26,9	2,6
06	149,3	7,1	20,0	0,9	-	-	70,1	3,3
07	165,3	12,8	20,3	1,6	2,6	0,2	53,7	4,2
08	187,4	10,7	14,1	0,8	-	-	44,8	2,6
09	174,1	9,0	21,6	1,1	-	-	28,1	1,5
10	117,1	10,2	26,7	2,3	1,5	0,1	38,5	3,4
11	126,0	10,9	16,4	1,4	12,5	1,1	52,7	4,6
12	147,4	9,4	7,1	0,5	10,2	0,7	21,1	1,3
13	120,7	9,4	16,4	1,3	4,6	0,4	51,6	4,0
14	172,9	9,1	15,7	0,8	11,9	0,6	63,4	3,3
15	163,7	8,5	23,2	1,2	12,1	0,6	57,5	3,0
16	105,4	8,4	22,3	1,8	7,3	0,6	37,7	3,0
17	129,2	10,7	18,0	1,5	3,8	0,3	53,2	4,4
18	90,7	7,6	21,2	1,8	19,8	1,7	69,2	5,8
19	117,2	10,0	17,8	1,5	14,5	1,2	53,3	4,6
20	124,3	6,4	18,0	0,9	5,5	0,3	79,1	4,1
21	188,2	9,3	24,5	1,2	4,3	0,2	88,8	4,4
<b>Média ± Desvio Padrão</b>	<b>133,8 ± 32,5</b>	<b>9,1 ± 1,6</b>	<b>18,7 ± 4,4</b>	<b>1,3 ± 0,4</b>	<b>7,7 ± 5,0</b>	<b>0,6 ± 0,4</b>	<b>49,7 ± 18,4</b>	<b>3,4 ± 1,1</b>

Apesar da maioria das áreas exploradas ter apresentado impactos inferiores aos definidos pelo SFB (8% da área total da UPA) decorrentes da abertura de trilhas de arraste, estradas e pátios, a intensidade de exploração média foi de  $14,8 \pm 3,6$  m<sup>3</sup>/ha. Tal volume explorado é consideravelmente inferior ao máximo permitido para um ciclo de corte de 30 anos, por volta de 25 m<sup>3</sup>/ha (Tabela 2.4).

**Tabela 2.4.** Estimativa dos danos no sub-bosque decorrentes da exploração seletiva de madeira em áreas de manejo florestal sustentável para cada uma das áreas de interesse deste estudo, por meio de classificação visual.

<b>Código da área</b>	<b>Dano trilha de arraste</b>	<b>Dano estrada secundária</b>	<b>Dano estrada primária</b>	<b>Dano pátio</b>	<b>Dano total sub-bosque</b>
01	4,7%	1,0%	0,9%	0,5%	7,1%
02	2,4%	0,6%	0,3%	0,3%	3,6%
03	4,4%	1,1%	0,3%	0,5%	6,3%
04	3,6%	1,1%	0,5%	0,2%	5,4%
05	3,8%	1,0%	0,4%	0,3%	5,5%
06	5,3%	1,0%	0,0%	0,7%	7,0%
07	5,9%	1,0%	0,2%	0,5%	7,6%
08	6,7%	0,7%	0,0%	0,4%	7,8%
09	6,2%	1,1%	0,0%	0,3%	7,6%
10	4,1%	1,4%	0,1%	0,4%	6,0%
11	4,5%	0,8%	1,1%	0,5%	6,9%
12	5,2%	0,4%	0,9%	0,2%	6,7%
13	4,3%	0,9%	0,2%	0,5%	5,9%
14*	6,1%	0,8%	1,0%	0,6%	8,5%
15*	5,8%	1,2%	1,0%	0,6%	8,6%
16	3,8%	1,1%	0,6%	0,4%	5,9%
17	4,6%	0,9%	0,3%	0,5%	6,3%
18	3,3%	1,1%	2,1%	0,7%	7,2%
19	4,1%	0,9%	0,9%	0,5%	6,4%
20	4,4%	0,9%	0,5%	0,8%	6,6%
21*	6,7%	1,2%	0,4%	0,9%	9,2%
<b>Média ±</b>	<b>4,8%</b>	<b>1,0%</b>	<b>0,6%</b>	<b>0,5%</b>	<b>6,8%</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>± 1,2%</b>	<b>± 0,2%</b>	<b>± 0,5%</b>	<b>± 0,2%</b>	<b>± 1,3%</b>

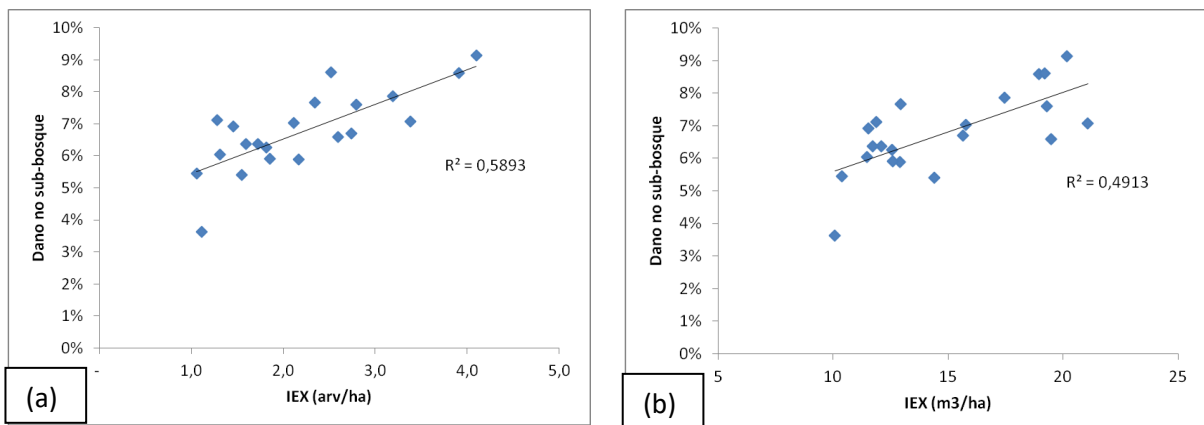
\*áreas que extrapolaram o limite de 8% de dano no sub-bosque aceito pelo SFB para concessões florestais.

Assumindo que os impactos à floresta estão positivamente relacionados ao número de árvores exploradas/hectare (Figura 2.6a) e ao volume explorado (m<sup>3</sup>/ha) (Figura 2.6b), o

uso de modelos geospaciais de planejamento associados a informações técnicas e métodos computacionais pode otimizar a construção da infraestrutura de exploração, reduzindo assim os danos causados no sub-bosque e os custos da produção florestal (EMMERT, 2014).

A média dos danos no sub-bosque em florestas sob concessão florestal federal foi de 6,8%  $\pm$ 1,3%. Esta média é próxima à observada em estudos baseados em levantamentos de campo em florestas tropicais submetidas a exploração de impacto reduzido, cujos resultados variaram de 4,6% a 8,6% (HENDRISON et al., 1989; JOHNS et al., 1996; PEREIRA et al., 2002; ASNER et al., 2004; LENTINI et al., 2009). O maior percentual de área alterada no sub-bosque florestal para implantação de infraestrutura de exploração é decorrente da abertura de trilhas de arraste, aproximadamente 69,9%  $\pm$ 7,9%, seguido pela construção de estradas secundárias 14,4%  $\pm$ 3,8%, estradas primárias 8,3%  $\pm$ 6,9% e pátios 7,3%  $\pm$ 2,3% (Tabela 2.4).

As trilhas de arraste constituem o tipo de infraestrutura florestal que mais impacta o sub-bosque florestal. Entretanto, são consideradas infraestrutura temporária e, por isso, tem sua identificação comprometida utilizando dados de sensores remotos dois a três anos após a exploração da área (MATRICARDI et al. 2010), mesmo em análises de dados LiDAR (LOCKS & AMARAL, 2015). Portanto, deve ser considerado que para a mensuração do dano ao sub-bosque de uma floresta manejada, a coleta LiDAR deve ocorrer até um ano após o encerramento das atividades exploração.



**Figura 2.6.** Correlação entre dano no sub-bosque e IEX=Intensidade de Exploração, (a) relação entre dano no sub-bosque e a quantidade de árvores exploradas por hectare; (b) relação entre dano no sub-bosque e volume, em metro cúbicos, explorado por hectare.

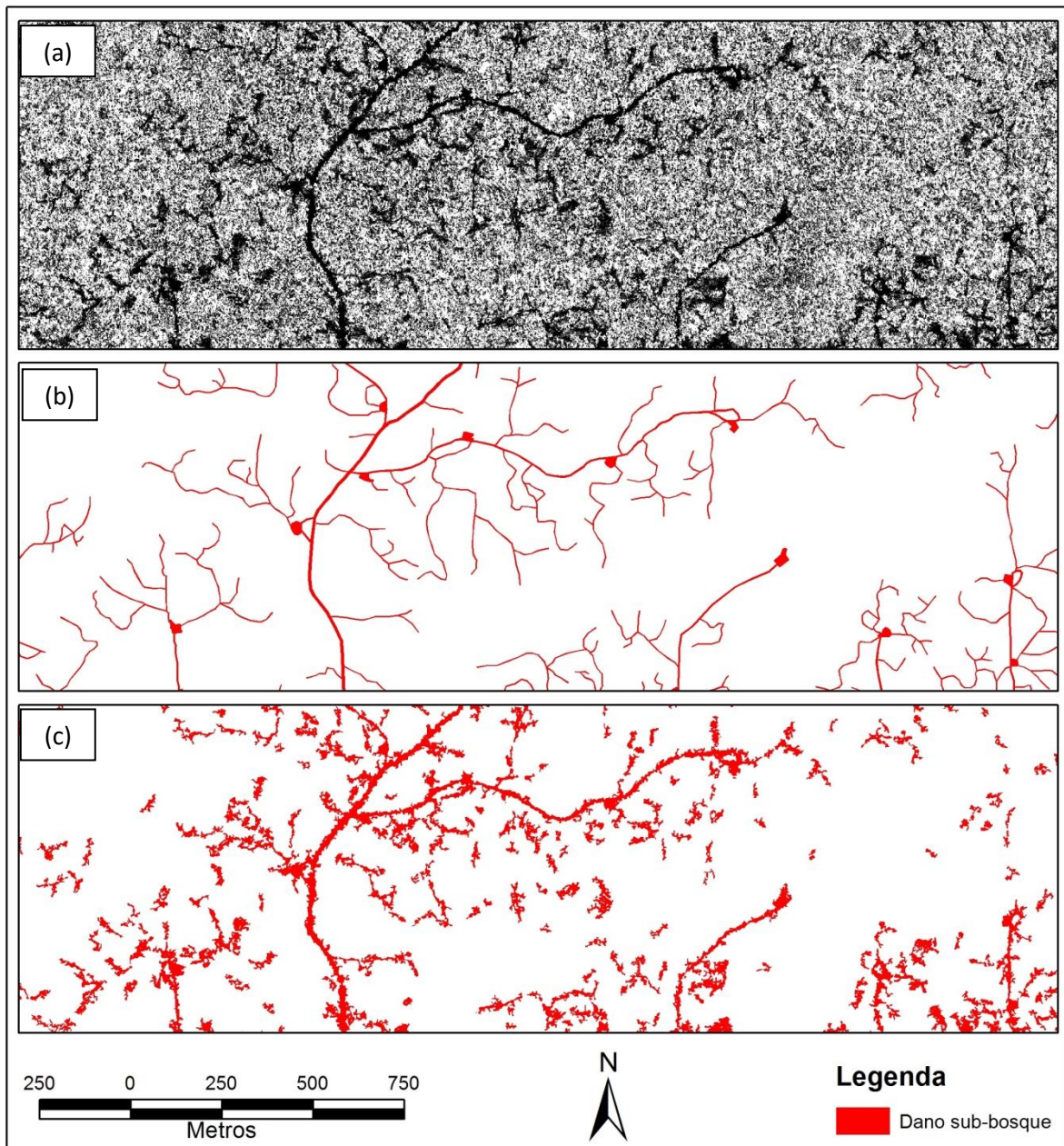
O mapeamento automático de danos no sub-bosque florestal foi realizado apenas para as nove áreas de interesse localizadas na Floresta Nacional do Jamari/RO. Esta técnica trouxe maior rapidez na análise e reduziu a subjetividade e dependência do intérprete da imagem quando comparado com o método visual (manual). Porém, a quantidade total de área de florestas consideradas impactadas pelo método automático é 2,3 vezes superior ao resultado da inspeção visual (manual), que se baseou na largura média das infraestruturas coletadas em campo para sua extrapolação (Tabela 2.5).

**Tabela 2.5.** Comparação dos resultados da classificação visual e automática de dano no sub-bosque decorrente da exploração florestal para cada uma das áreas de interesse deste estudo.

Código da área	Flona	Ano exploração	Coleta LiDAR	Dano total sub-bosque (%)		
				Visual	Automático	Diferença
01	JAM	2011	2011	7,0%	13,2%	87,5%
02	JAM	2011	2011	3,6%	9,7%	167,8%
03	JAM	2013	2013	6,3%	10,8%	72,1%
04	JAM	2013	2014	5,4%	4,4%	-17,7%
05	JAM	2013	2014	5,5%	7,2%	32,5%
09	JAM	2014	2014	7,6%	16,9%	123,2%
10	JAM	2014	2014	6,0%	9,9%	63,2%
15	JAM	2015	2015	8,6%	28,0%	225,9%
16	JAM	2015	2015	5,9%	27,9%	371,7%
<b>Média ±</b>				<b>6,2%</b>	<b>14,2%</b>	<b>125,1%</b>
<b>Desvio Padrão</b>				<b>± 1,4%</b>	<b>± 8,5%</b>	<b>± 117,2%</b>

Uma das razões dos valores de dano do mapeamento automático terem sido maiores do que o mapeamento manual pode ser decorrente da riqueza de detalhes presentes em nuvens de pontos LiDAR, que visualmente indicam gradientes de degradação no entorno da infraestrutura de exploração, negligenciados durante medições de campo. Ou seja, pode ser que parte dos impactos detectados automaticamente sejam reais. Outro fato é que, em campo, não foi medida a área no sub-bosque impactada pela queda das árvores, aparentemente presente no mapeamento automático (Figura 2.7). D'Oliveira et al. (2012) estimaram 15,4% de impacto no sub-bosque utilizando a métrica de RDM para avaliação do dano no sub-bosque de uma floresta tropical objeto de manejo, próximo aos impactos médios ( $14,2\% \pm 8,5\%$ ) estimados automaticamente no presente estudo.





**Figura 2.7.** Comparação entre o dano no sub-bosque mapeado via classificação visual e automática. (a) imagem de referência - RDM; (b) classificação visual, utilizando valores médios de largura das infraestruturas obtidos em campo para geração dos polígonos de dano; (c) mapeamento obtido através da classificação automática da imagem de referência. Área 02, Flona do Jamari/RO.

As áreas de interesse 04 e 05 do presente estudo apresentaram os menores valores de dano no sub-bosque pela classificação automática. Estas áreas também foram as únicas com mapeamento LiDAR disponíveis feito um ano após sua exploração, ou seja, é possível que a regeneração natural ocorrida neste intervalo de tempo influenciou a quantidade de danos detectados na classificação automática. Na classificação automática foram utilizados os

mesmos parâmetros de classificação para todas as áreas, o que também ajuda a explicar as diferenças encontradas. Isto indica a necessidade de calibração dos parâmetros da classificação automática para cada uma das áreas, conforme a disponibilidade de dados, em especial para áreas que tiveram seu mapeamento LiDAR realizado em momentos distintos do final da exploração.

Estas diferenças entre o mapeamento manual e a classificação automática do dano ao sub-bosque, revelam que ainda são necessários estudos mais aprofundados e validados em campo sobre a estimativa de impactos na floresta utilizando dados de sensores remotos, incluindo dados LiDAR. Os resultados do mapeamento automático do presente estudo parecem bem robustos, porém devem ser utilizados levando em conta as suas limitações.

#### **2.4.2. Validação do mapeamento dos danos no sub-bosque**

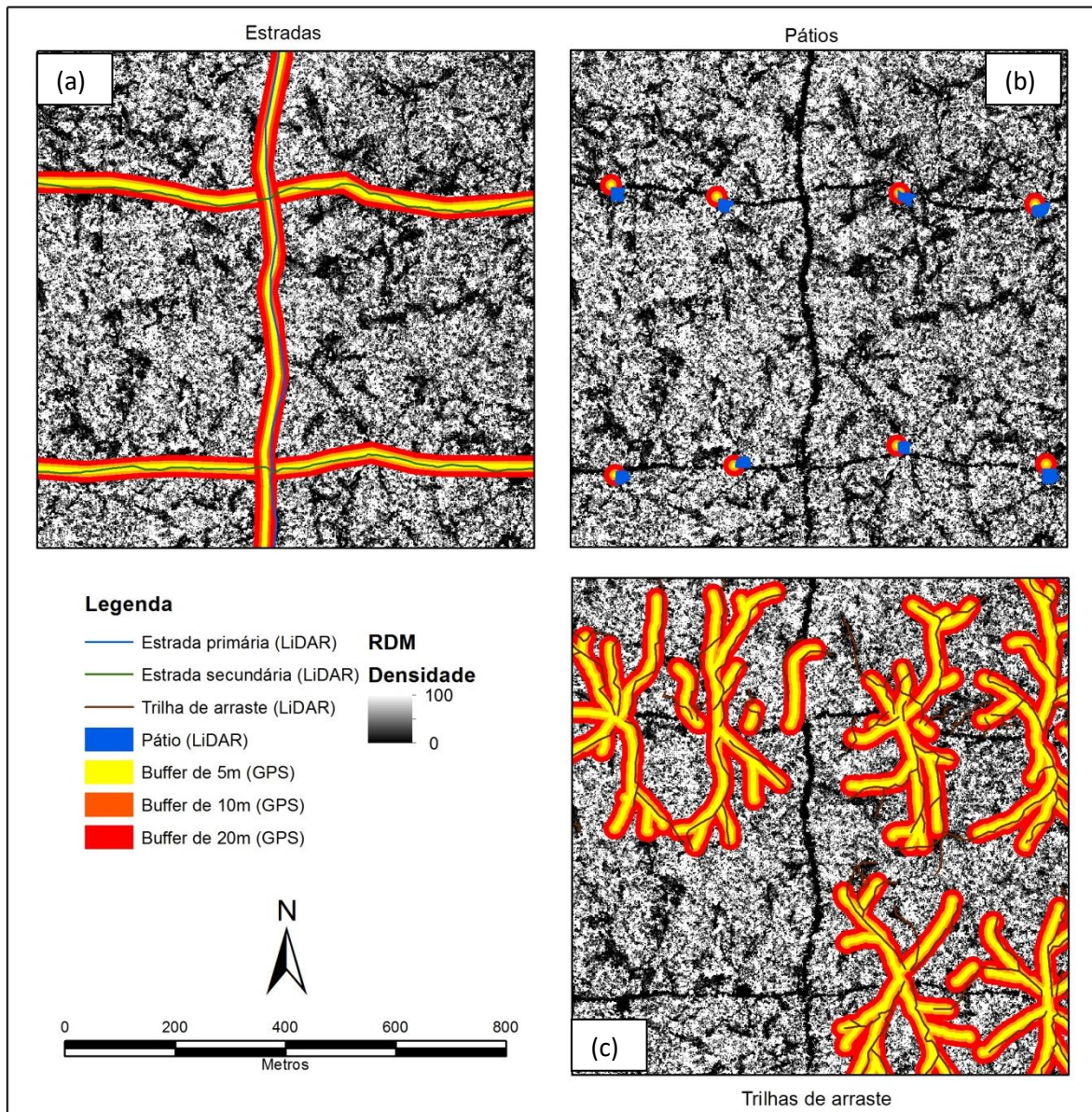
A validação do mapeamento LiDAR, feita a partir da comparação com dados de campo coletados com GNSS de navegação, demonstra que as ambas as técnicas apresentam resultados semelhantes (Figura 2.8 e Tabela 2.6). A diferença quantitativa do mapeamento de cada uma das infraestruturas de exploração, com exceção das trilhas de arraste, foi muito próxima de zero.

O mapeamento LiDAR acabou superestimando em 9,4% o total de trilhas de arraste, para a área controle, quando comparado com dados de GNSS. Uma das razões pode ser a inclusão de parte das áreas de clareira/galhada, que também perturbam o sub-bosque, como continuação das trilhas de arraste. Outra razão é a dificuldade de mapeamento em campo de todas as trilhas de arraste depois de encerrada a operação, como feito neste estudo. Elli et al. (2016) também encontraram um valor 14% superior no mapeamento de trilhas de arraste e áreas de queda de árvore utilizando LiDAR quando comparado com dados de campo obtidos com GNSS de navegação.

Com relação a acurácia posicional (Tabela 2.6), considerando um erro posicional de até 20 metros para o GNSS, o mapeamento LiDAR se equipara ao mapeamento de campo. Elli et al. (2016) encontraram resultado ligeiramente inferior no estudo que conduziram na Indonésia, uma sobreposição de 59% das trilhas de arraste, considerando um erro posicional de até 10 metros para o GNSS. Neste estudo, para os mesmos 10 metros, a sobreposição foi de 65%. Porém, o erro posicional de até 20 metros para um GNSS de navegação, trabalhando embaixo do dossel florestal, é comum em levantamento de campo,



dessa maneira faz-se importante considerá-lo (GARRASTAZU et al., 2011). Os locais de dossel mais aberto, como estradas primárias e pátios, foram os que apresentaram maior acurácia posicional, corroborando com a afirmação de que um dossel fechado contribui para o aumento do erro posicional do GNSS.



**Figura 2.8.** Validação da digitalização, baseada em dados LiDAR, do dano a floresta remanescente com o mapeamento utilizando GNSS em campo; (a) estradas primárias e secundárias sobrepostas às extrapolações (*buffer*) de 5, 10 e 20m dos dados de campo; (b) poligonal dos pátios sobrepostas às extrapolações (*buffer*) de 5, 10 e 20m da coordenada central do pátio obtida em campo; (c) trilhas de arraste sobrepostas às extrapolações (*buffer*) de 5, 10 e 20m dos dados de campo. Área 01, Flona do Jamari/RO.



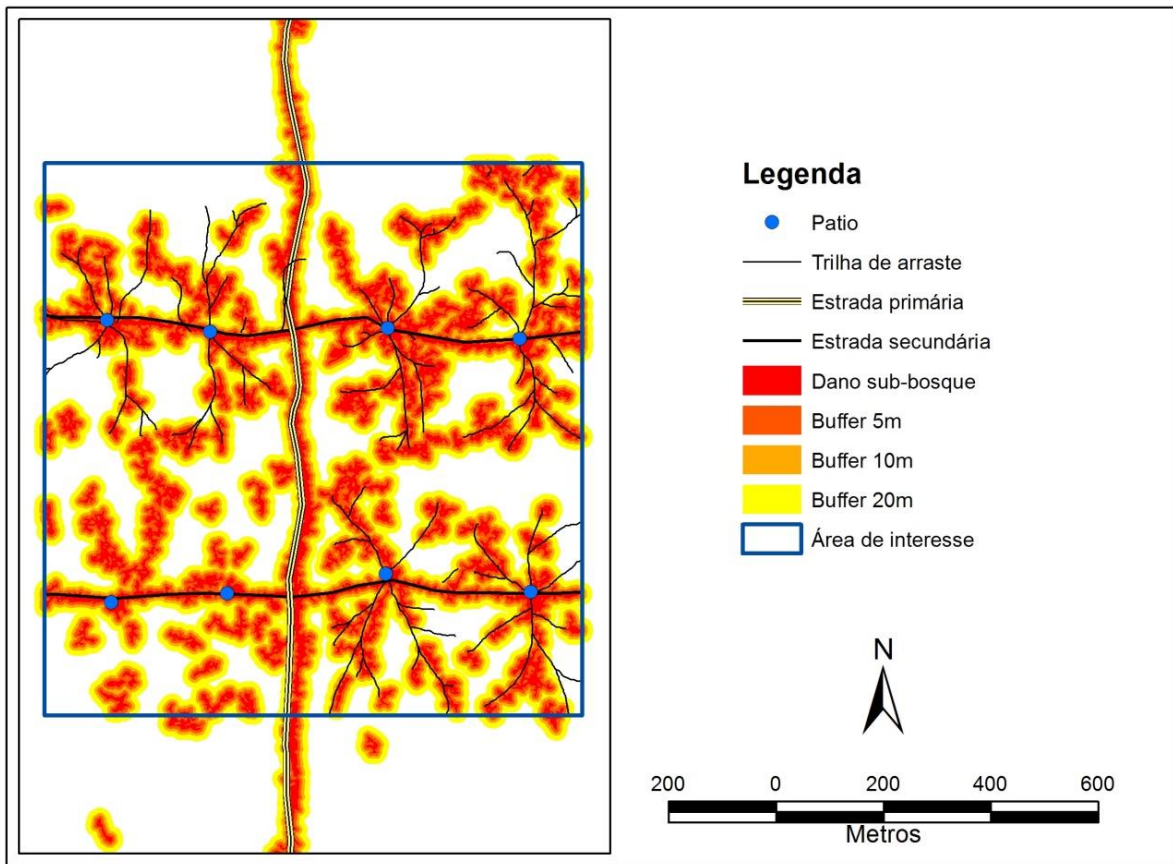
**Tabela 2.6.** Comparação do quantitativo de mapeamento dos danos a floresta remanescente utilizando dados de campo (GNSS) e dados LiDAR e sua acurácia.

Infraestrutura	Mapeamento - GNSS	Mapeamento - LiDAR	Diferença	Sobreposição (%)		
				5m	10m	20m
<b>Trilha de arraste (m)</b>	11.124,9	12.174,5	9,4%	36,0%	65,0%	86,5%
<b>Estrada secundária (m)</b>	12.260,2	12.281,4	0,2%	70,2%	92,6%	97,2%
<b>Estrada primária (m)</b>	12.057,3	12.042,0	-0,1%	53,5%	81,3%	99,0%
<b>Pátio (un)</b>	35	35	0,0%	88,6%	91,4%	100,0%

O mapeamento automático de danos no sub-bosque florestal também apresentou acurácia posicional compatível com os dados coletados em campo com equipamento GNSS. Quando considerada uma distância de até 20m do dano mapeado automaticamente via LiDAR, foi encontrada uma sobreposição superior a 90% para todas as infraestruturas mapeadas em campo com GNSS de navegação (Tabela 2.7 e Figura 2.9). As infraestruturas que implicam numa maior abertura do dossel florestal, como pátios e estradas primárias, foram as que apresentaram maior acurácia.

**Tabela 2.7.** Resultado da avaliação da acurácia posicional dos danos a floresta remanescente utilizando dados de campo (GNSS) e do mapeamento automatizado baseado em LiDAR.

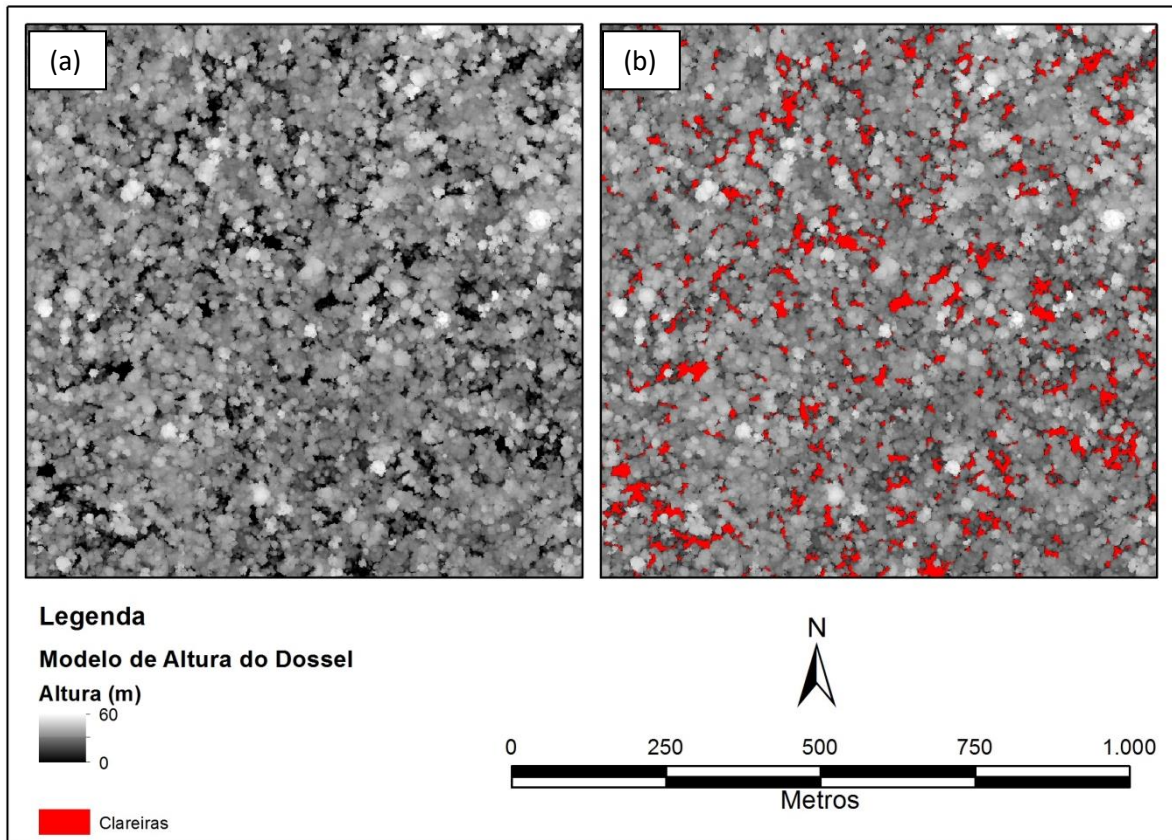
	Quantidade	Sobreposição (%)			
		0 m	5 m	10 m	20 m
<b>Trilha de arraste</b>	11.124,86 m	3.787,49	7.196,42	8.918,38	10.029,66
	100%	34%	65%	80%	90%
<b>Estrada secundária</b>	9.426,78 m	6.379,22	8.836,39	9.112,50	9.271,91
	100%	68%	94%	97%	98%
<b>Estrada primária</b>	12.057,29 m	8.007,56	10.858,08	11.829,09	12.029,90
	100%	66%	90%	98%	100%
<b>Pátio</b>	35 un	26	33	34	35
	100%	74%	94%	97%	100%



**Figura 2.9.** Validação da classificação, baseada em dados LiDAR, do dano a floresta remanescente com o mapeamento utilizando GNSS em campo. Obs. No canto inferior esquerdo há dois pátios que não tiveram suas trilhas de arraste mapeadas em campo. Área 01, Flona do Jamari/RO.

### 2.4.3. Mapeamento de clareiras

Conforme apresentado na Figura 2.10 (a), a métrica CHM apresenta com riqueza de detalhes o dossel florestal, sendo possível a identificação da quantidade, altura e formato da copa de cada uma das árvores emergentes. Os tons da imagem CHM representam em cores mais claras, valores de maior altura em relação ao terreno e, as células em cores mais escuras, o próprio terreno ou pontos próximos. Na figura 2.10 (b) foi sobreposta a camada de clareiras (polígonos vermelhos), consideradas como regiões com menos de 10 metros de altura e mais de 10 metros quadrados de área, extraídas da própria métrica de CHM.



**Figura 2.10.** Identificação de clareiras em uma área submetida a exploração de madeira via Manejo Florestal Sustentável. A métrica CHM (a) apresenta a altura de cada célula em relação ao terreno, dessa maneira, é possível identificar as células com menos de 10 metros de altura e com área contígua superior a 10 metros quadrados, consideradas clareiras, representadas por polígonos em vermelho (b). Área 06, Flona de Saracá-Taquera/PA.

Na média, estas clareiras ocupam  $7,8\% \pm 1,4\%$  da área total explorada (Tabela 2.8), mas nem toda clareira identificada pode ser considerada como resultado da exploração da área, uma boa parte delas ocorre naturalmente, assim como visto por Hunter et al. (2015), ao avaliarem as clareiras naturais presentes em área de floresta primária na Floresta Nacional do Tapajós/PA e na Reserva Ducke/AM, utilizando dados LiDAR, encontraram valores de 4,8% e 2%, respectivamente, como percentual das áreas ocupadas por clareiras naturais. Não é possível determinar a exata quantidade de clareiras originadas por conta da exploração florestal sem considerar uma cobertura LiDAR multitemporal, antes e depois da exploração, ainda assim é possível identificar, a partir dos dados levantados apenas após a exploração, que as áreas manejadas apresentam dossel bastante fechado, com mais de 90% de cobertura.

**Tabela 2.8.** Estimativa dos impactos no dossel florestal resultantes da abertura de clareiras identificadas nas áreas de interesse, exploradas via manejo florestal sustentável.

<b>Código da área</b>	<b>Flona</b>	<b>Clareiras após a exploração</b>
01	JAM	8,9%
02	JAM	7,2%
03	JAM	7,0%
04	JAM	6,0%
05	JAM	5,5%
06	FST	8,1%
07	FST	6,8%
08	FST	9,8%
09	JAM	10,6%
10	JAM	6,5%
11	JAC	8,0%
12	FST	9,5%
13	FST	7,6%
14	FST	7,1%
15	JAM	8,3%
16	JAM	6,7%
17	JAC	6,2%
18	JAC	9,0%
19	JAC	7,3%
20	FST	10,1%
21	FST	7,4%
<b>Média</b>		<b>7,8%</b>
<b>± Desvio Padrão</b>		<b>± 1,4%</b>

Dentre as 21 áreas de interesse, cinco delas tiveram o mapeamento LiDAR realizado tanto antes como logo após a sua exploração, duas destas áreas estão localizadas na Flona de Saracá-Taquera/PA e três na Flona do Jamari/RO. Para estas áreas, foi realizada a mensuração da quantidade de clareiras naturais (antes da exploração) e comparado seu resultado com a quantidade de clareiras após a exploração (Tabela 2.9). O padrão de clareiras antes e após uma exploração florestal pode ser observado na Figura 2.11.

A área ocupada por clareiras naturais nas parcelas avaliadas (Tabela 2.9) foi, em média, de  $3,7\% \pm 1,3\%$ . Dessa maneira, a média de abertura de clareiras em função da exploração

florestal seletiva de madeira é da ordem de  $4,9\% \pm 0,9\%$ . Matricardi et al. (2013), utilizando imagens dos satélites Landsat TM e ETM+, mensuraram a alteração no dossel florestal em  $5,0\% \pm 0,4\%$  para áreas recém manejadas na Amazônia brasileira, a técnica utilizada pelos autores, denominada *Modified Soil Adjusted Vegetation Index aerosol free* (MSAVIaf), é dependente da quantidade de solo exposto na região florestal, ou seja, das áreas de clareiras na floresta, o que ajuda a explicar a similaridade dos resultados mesmo considerando técnicas e sensores tão diferentes ao deste estudo.

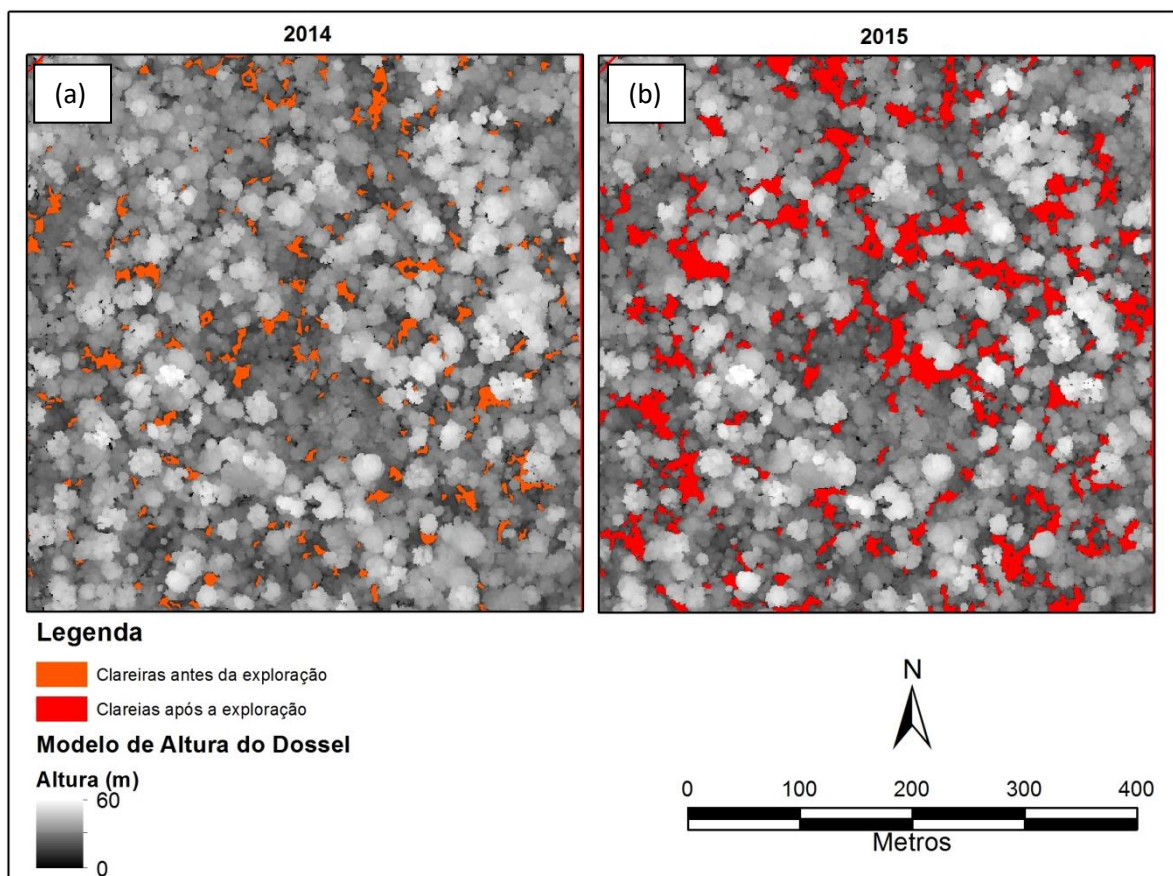
**Tabela 2.9.** Resultado da mensuração da área de clareiras decorrentes do manejo florestal sustentável.

Código área	Flona	Clareiras antes da exploração (A)	Clareiras após a exploração (B)	Clareiras decorrentes da exploração (B-A)
09	JAM	5,7%	10,6%	5,0%
14	FST	2,1%	7,1%	5,0%
15	JAM	3,3%	8,3%	4,9%
16	JAM	3,2%	6,7%	3,5%
20	FST	4,1%	10,1%	6,0%
<b>Média</b>		<b>3,7%</b>	<b>8,6%</b>	<b>4,9%</b>
<b>± Desvio Padrão</b>		<b>± 1,3%</b>	<b>± 1,7%</b>	<b>± 0,9%</b>

O limite estabelecido pelo SFB, em seus contratos de concessão, para abertura de clareiras, é de 10% do total da área manejada, ou seja, as áreas avaliadas estão dentro dos limites de impactos estabelecidos pelo SFB. A área 16 foi a que apresentou a menor quantidade de clareiras decorrentes do manejo, sendo também a parcela que recebeu menor intensidade de exploração,  $12,2 \text{ m}^3/\text{hectare}$ . Em contrapartida a área 20, que apresentou o maior valor de clareiras decorrentes do manejo, foi a que registrou a maior intensidade de exploração,  $19,1 \text{ m}^3/\text{hectare}$ . Foi identificada forte correlação entre a área de clareiras decorrentes da exploração e o volume de madeira explorado por hectare (Figura 2.12 a). O mesmo não foi verificado comparando as clareiras com a quantidade de árvores exploradas por hectare (Figura 2.12 b).

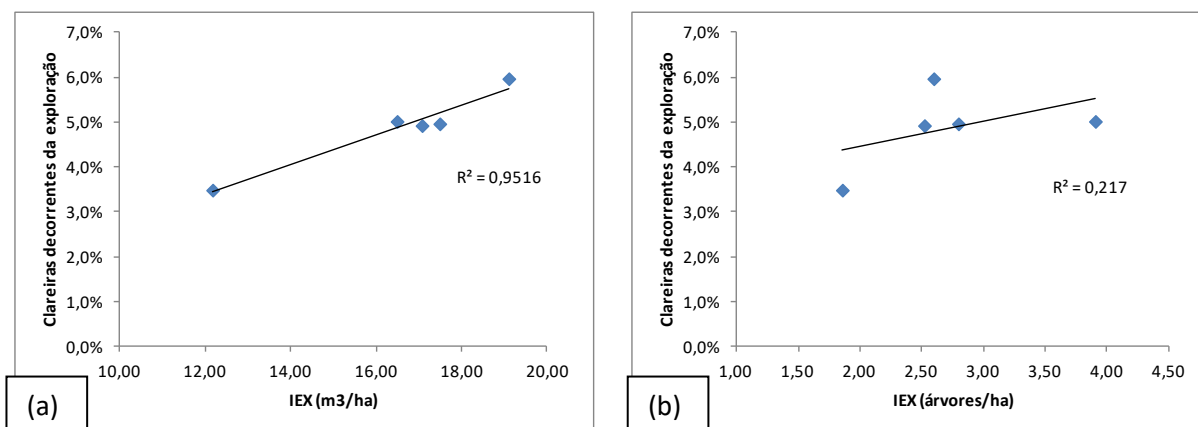
A localização geográfica de cada uma das árvores abatidas nas florestas sob concessão federal é uma informação disponível no Serviço Florestal Brasileiro, mas mensurar a área afetada por sua queda não havia sido feito até o momento. O mapeamento das clareiras em campo demandaria a mobilização de uma equipe de técnicos bastante grande, visto que

mais de 20 mil árvores são derrubadas a cada ano, e este número cresce de acordo com o aumento das áreas sob concessão. Dentro das cinco áreas de interesse deste estudo onde foi possível quantificar a quantidade de clareiras decorrentes da exploração, foram derrubadas 1.454 árvores. Para estas áreas, foi encontrada uma média de  $186,6 \pm 33,5 \text{ m}^2/\text{árvore}$  e  $27,9 \pm 2,6 \text{ m}^2/\text{m}^3$  explorado. Asner et al. (2004), ao mensurarem em campo a abertura de clareiras em quatro áreas objeto de Exploração de Impacto Reduzido, encontraram o valor de  $175 \pm 42 \text{ m}^2/\text{árvore}$ , bem próximo ao encontrado neste estudo. Explorações de madeira que não utilizaram técnicas de impacto reduzido, também avaliadas por Asner et al. (2004), apresentaram abertura de clareiras muito superior, da ordem de  $328 \pm 143 \text{ m}^2/\text{árvore}$ .



**Figura 2.11.** Identificação de clareiras em uma área de floresta antes (a) e após (b) a exploração de madeira via Manejo Florestal Sustentável. Área 20, Flona de Saracá-Taquera/PA.





**Figura 2.12.** Correlação entre a área de clareiras decorrentes da exploração florestal e a IEX=Intensidade de Exploração, (a) relação entre área de clareiras e volume, em metro cúbico, explorado por hectare; (b) relação entre área de clareiras e a quantidade de árvores exploradas por hectare.

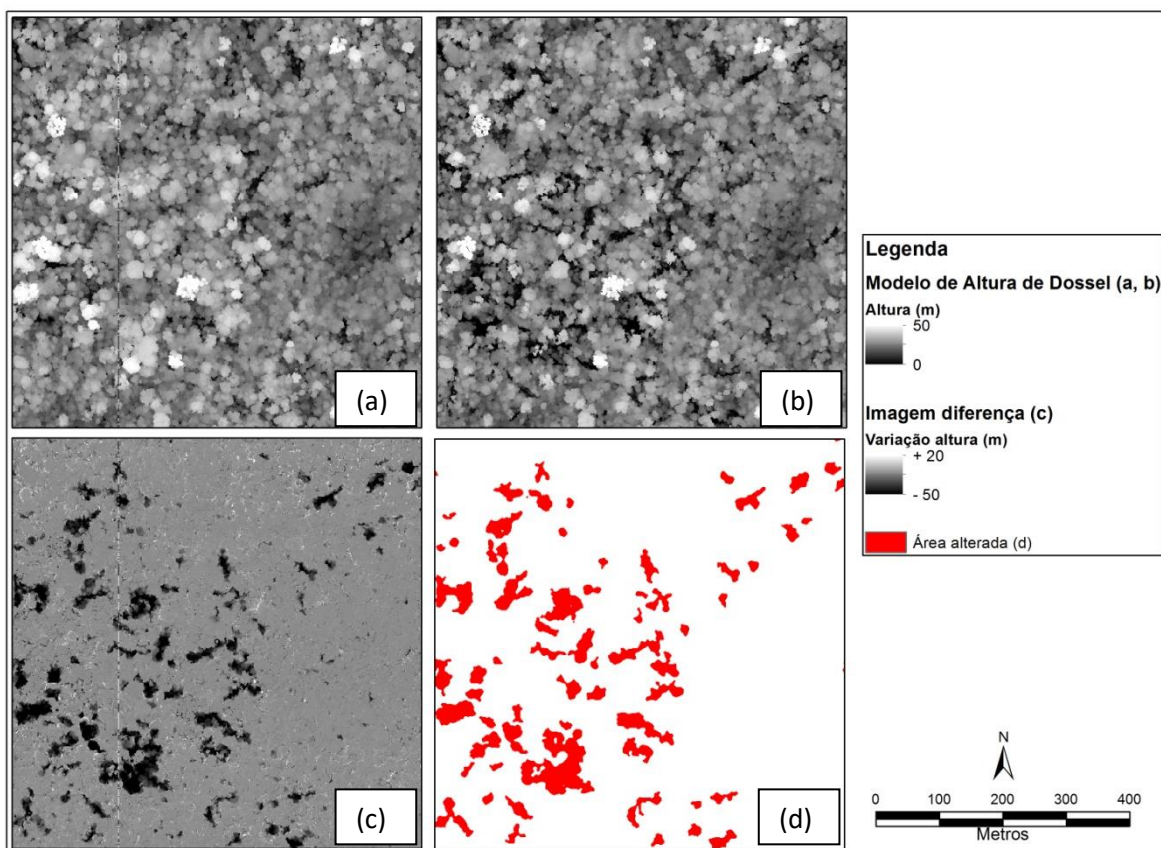
#### 2.4.4. Mapeamento do dano no dossel

A abertura de clareiras pode ser considerada um dos parâmetros de dano à floresta objeto de manejo florestal. Porém, a derrubada das árvores não gera apenas uma clareira. Considerando que o extrato vertical de uma floresta nativa é composto de árvores de diferentes tamanhos e alturas, a derrubada de uma árvore, além de abrir uma clareira, expõe a copa de outras árvores. Nesse sentido, foram utilizados os dados LiDAR multitemporais (antes e após a exploração) para estimar a total alteração no dossel florestal decorrente do manejo (Tabela 2.10 e Figura 2.13).

A quantidade total de dano no dossel florestal, definido como a área com redução superior a dois metros de altura após exploração florestal, é superior a quantidade de clareiras. Na média,  $12,8\% \pm 3,0\%$  da área explorada apresentam redução no dossel (Tabela 2.10).

**Tabela 2.10.** Área total de dossel afetada pelo manejo florestal sustentável.

Código da área	Flona	Dano total no dossel
09	JAM	13,5%
14	FST	12,6%
15	JAM	12,3%
16	JAM	8,6%
20	FST	17,1%
<b>Média</b>		<b>12,8%</b>
<b>± Desvio Padrão</b>		<b>± 3,0%</b>



**Figura 2.13.** Alterações no Modelo de Altura do Dossel de uma floresta objeto de manejo florestal sustentável, (a) Modelo de Altura do Dossel antes da exploração; (b) Modelo de Altura do Dossel após a exploração; (c) imagem diferença entre a e b, demonstrando locais de aumento e redução de altura (d) resultado da classificação da imagem diferença destacando a área de dano no dossel, representada pelos polígonos vermelhos. Área 09, Flona do Jamari/RO.

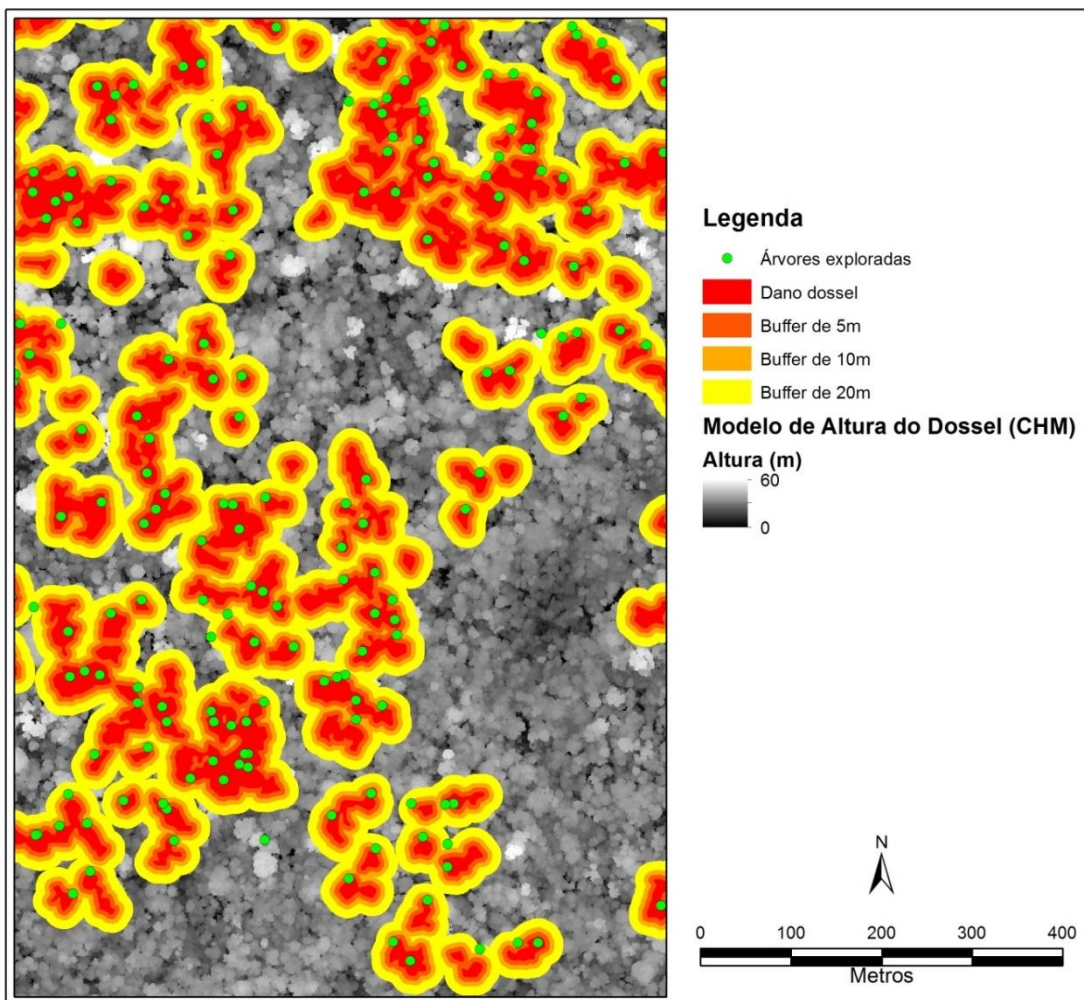
#### 2.4.5. Validação do mapeamento do dano no dossel

Praticamente, todas as árvores exploradas (93,3%) nas áreas de interesse foram interceptadas pelo dano no dossel identificado no mapeamento LiDAR (Tabela 2.11 e Figura 2.14). Neste caso, foi considerado um erro posicional de até 20 metros para o GNSS.

**Tabela 2.11.** Resultado da avaliação da acurácia posicional das árvores exploradas, mapeadas em campo com GNSS de navegação, e o dano no dossel, identificado a partir da diferença entre os Modelos de Altura do Dossel obtidos antes e após a exploração florestal.

Árvores exploradas		Sobreposição (%)			
		0 m	5m	10m	20m
Unidade	1.454	618	1.000	1.190	1.356
Percentual	100%	42,5%	68,8%	81,8%	93,3%





**Figura 2.14.** Representação da avaliação da acurácia posicional das árvores exploradas, mapeadas em campo com GNSS de navegação, o dano no dossel, identificado a partir da diferença entre os Modelos de Altura do Dossel obtidos antes e após a exploração florestal. Área 09, Flona do Jamari/RO.

## 2.5.CONCLUSÕES

É possível monitorar com boa acurácia a exploração seletiva de madeira utilizando dados LiDAR, incluindo a mensuração dos danos no sub-bosque e dossel florestal na área explorada. Os resultados das estimativas utilizando dados LiDAR são similares as medições feitas em campo. Assumindo um erro posicional de até 20 metros, mais de 90% da infraestrutura de exploração florestal mapeada com LiDAR é coincidente com dados coletados em campo com GNSS. Considerando o mesmo erro posicional, 93,3% das árvores abatidas são interceptadas pelo dano no dossel mapeado com LiDAR.

A exploração realizada nas áreas de concessão florestal federal do presente estudo, no que diz respeito ao dano a floresta remanescente, pode ser considerada como de impacto

reduzido. O dano médio identificado no sub-bosque da floresta remanescente foi de 6,8%  $\pm$ 1,3%. O percentual de clareiras encontradas nas áreas exploradas foi de 7,8%  $\pm$ 1,4%, sendo que para as áreas com cobertura LiDAR multitemporal a abertura de clareiras decorrentes do manejo florestal (descontado os impactos das clareiras naturais presentes antes da exploração) foi de 4,9%  $\pm$  0,9%.

O mapeamento de danos no sub-bosque utilizando classificação automática da métrica de RDM apresentou valores 2,3 vezes superior ao dano do mapeamento manual, sendo a sua acurácia posicional similar aos dados coletados em campo com GNSS de navegação. Além disso, foi identificado indício de que a classificação automática é mais sensível ao tempo decorrido entre o fim da exploração e a aquisição dos dados (sobrevoo) LiDAR do que o método manual, por conta da rápida regeneração natural na área no período.

Observou-se correlação entre o dano a floresta remanescente e a intensidade de exploração, indicando que os baixos valores encontrados de dano ao sub-bosque são, em parte, explicados pela baixa intensidade média de exploração, 14,8 m<sup>3</sup>/ha. Dessa maneira, deve ser preocupação constante dos concessionários do SFB aperfeiçoar suas técnicas de manejo para que, no caso de exploração plena da área (exploração de até 25,8 m<sup>3</sup>/ha para um ciclo de corte de 25 anos), os danos não ultrapassem o limite contratual de 8% na floresta.

Mensurar o dano a floresta remanescente, utilizando dados LiDAR, pode contribuir com o monitoramento da atividade madeireira na Amazônia brasileira, pois permite não apenas identificar com precisão as áreas manejadas, mas também qualificar, de maneira objetiva, a execução de um Plano de Manejo Florestal Sustentável.

### **3. ESTIMATIVA DO VOLUME DE MADEIRA EXPLORADO VIA MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL UTILIZANDO DADOS LIDAR.**

#### **3.1.RESUMO DA PESQUISA**

Atualmente os métodos existentes para medir a área basal e o volume de fuste em uma floresta tropical envolvem extensos trabalhos de campo, são caros e demorados. Para o desenvolvimento do setor florestal é importante a busca pelo aumento da eficiência e precisão dos métodos de quantificação do estoque de madeira, bem como o volume retirado durante o manejo florestal. A produção de estimativas a partir do escaneamento digital de florestas, por meio do uso do LiDAR aerotransportado, além de trazer benefícios para a operação, potencializando o uso de técnicas de manejo de precisão, torna mais robusto o monitoramento remoto da execução de Planos de Manejo Florestal Sustentáveis.

Nesse sentido, o presente trabalho avaliou o uso de dados gerados pela tecnologia LiDAR aerotransportada para estimar área basal e volume de fuste para Floresta Nacional do Jamari, Rondônia, Brasil. Usadas como variáveis independentes, as métricas produzidas pelo levantamento LiDAR, foram correlacionadas com os dados de parcelas permanentes, coletadas em campo, para construção dos modelos, através de regressões lineares.

Os modelos desenvolvidos foram avaliados pelo desempenho dos parâmetros estatísticos da regressão, como Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ), Raiz do erro quadrático médio (RMSE) e significância, via teste F. Eles também foram avaliados quanto ao pressuposto de normalidade, autocorrelação, homoscedasticidade e multicolinearidade. A partir de variáveis derivadas de dados LiDAR, foi possível desenvolver equações capazes de estimar com precisão o volume do fuste ( $R_{aj}^2=0,83$ , RMSE= 27,7 m<sup>3</sup>/ha) e a área basal ( $R_{aj}^2=0,72$  e RMSE=2,23 m<sup>2</sup>/ha). A aplicação do uso do modelo para estimativa da intensidade de exploração florestal via manejo apresentou resultados satisfatórios, com média das diferenças entre os valores estimados e observados de 4,12 m<sup>3</sup>/ha, o que representa uma diferença de 32,9%.

### **3.2.INTRODUÇÃO**

Boa parte das florestas mundiais está sob a ameaça da exploração ilegal de madeira, e apesar dos importantes progressos na redução da ilegalidade do setor florestal nos últimos anos, em 2013 aproximadamente 1/3 da madeira em tora (80 milhões de metros cúbicos) foi produzida ilegalmente (HOARE, 2015). Em 2014 foram produzidos 13,8 milhões de metros cúbicos de madeira em tora no Brasil (IBGE, 2016). Estatísticas não oficiais estimam que a produção de madeira ilegal no Brasil chega a 50% (HOARE, 2015). Madeireiros que operam na Amazônia brasileira exploram as falhas do sistema de controle para legalizar a entrada de madeira ilegal no mercado global, o esquema de exploração ilegal de madeira está fortemente baseado nos créditos florestais fraudulentos, bem como nas guias florestais obtidas por conta destes créditos (GREENPEACE, 2015). Este cenário demonstra que existe uma necessidade de melhorar o monitoramento da exploração florestal e produção de madeira tropical no Brasil.

Melhorar o monitoramento da exploração seletiva de madeira utilizando técnicas de sensoriamento remoto é um caminho que deve ser perseguido, pois a dimensão continental da Amazônia brasileira praticamente inviabiliza, por conta de custo e tempo, o monitoramento baseado em vistorias de campo. Porém, o desenvolvimento de técnicas de monitoramento remoto da floresta obrigatoriamente deve passar por validação de campo. Neste cenário, as concessões florestais federais representam uma fonte de informações valiosa para a condução de estudos no campo da ciência florestal, servindo como um grande laboratório para o desenvolvimento do setor florestal brasileiro, incluindo o aperfeiçoamento e o desenvolvimento de novas tecnologias de monitoramento. Dada a extensa quantidade de área sob concessão florestal, em torno de 840.000 de hectares (SFB, 2016), uma grande quantidade de dados de campo, capazes de caracterizar a estrutura da floresta e seu processo de exploração, são coletados anualmente. O rigoroso controle exercido nas áreas sob concessão florestal, onde atuam conjuntamente SFB, IBAMA, ICMBio e empresas de auditoria independentes, reduz a possibilidade de fraudes e aumenta a confiabilidade dos dados obtidos nestas áreas.

Outro ponto importante a ser considerado na melhoria do monitoramento remoto da exploração seletiva de madeira diz respeito ao sensor/tecnologia mais adequado para isso. Estudos que buscaram quantificar o estoque de madeira em áreas de floresta tropical

utilizando dados de sensoriamento remoto convencionais, como imagens de satélite ópticas e radar, não atingiram resultados satisfatórios até o momento devido a saturação destes sensores em florestas com alta biomassa (GIBBS et al., 2007; NGUYEN et al., 2016). Porém o uso de dados obtidos via LiDAR aerotransportado tem se mostrado útil para este fim, permitindo a obtenção de modelos, através de técnicas de regressão linear, que possibilitam a explicação de diversos parâmetros da estrutura florestal, como área basal, volume de fuste e biomassa (GIBBS et al., 2007; D'OLIVEIRA et al., 2012; MURA et al., 2015).

Considerando a abundância de dados de campo, como inventários florestais e parcelas permanentes, que são coletados para elaboração de PMFS na Amazônia, sua integração com dados LiDAR aerotransportados teria potencial para construção de modelos de biomassa, volume de fuste e de área basal para diferentes regiões florestais (D'OLIVEIRA et al., 2012; ASNER & MASCARO, 2014), o que aumentaria a efetividade do monitoramento da execução dos Planos de Manejo e contribuiria para a redução da produção ilegal de madeira.

Um dos entraves na integração entre dados de campo e LiDAR, decorre do fato destes dados de campo, originados em PMFS, não possuem amarração geográfica precisa, geralmente coletados com uso de GNSS de navegação (GARRASTAZU et al., 2011). Outra dúvida diz respeito às estimativas de volume de fuste em campo, pois apesar do DAP ser uma variável de fácil mensuração as outras informações necessárias para cálculo do volume de uma árvore ainda em pé, altura do fuste e coeficiente de forma, são geralmente estimadas e não mensuradas de fato (NOGUEIRA et al., 2008). Na tentativa de melhorar as estimativas de volume de fuste têm sido desenvolvidas diversas equações alométricas, inclusive algumas onde apenas o DAP é necessário como variável de entrada, mesmo assim, esta estimativa pode ser considerada outra fonte de erro na construção de modelos de predição do volume de fuste.

O presente trabalho buscou avaliar o uso de dados LiDAR aerotransportado para estimar a área basal e o volume de fuste em áreas de floresta tropical, usando como referência dados provenientes de parcelas permanentes, medidas em campo antes e após a exploração da área via manejo florestal sustentável. Os resultados deste estudo podem contribuir com o

monitoramento e controle da exploração seletiva de madeiras na Amazônia a partir do uso de dado LiDAR.

### **3.3.MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.3.1. Área de estudo**

A área de estudo está localizada na Floresta Nacional do Jamari (FLONA do Jamari), criada em 1984 e situada nos municípios de Itapuã do Oeste, Cujubim e Candeias do Jamari, no estado de Rondônia. A FLONA do Jamari envolve 220 mil hectares e, segundo a classificação fisionômica-ecológica do IBGE (2012), prevalece na unidade a Floresta Ombrófila Densa com porções de Floresta Ombrófila Aberta, que podem se apresentar com predominância de palmeiras ou com cipós, possui clima Tropical Chuvoso do tipo Aw (Köppen), com período seco bem definido na estação do inverno, precipitação média anual em torno de 2.400 mm e temperatura média anual de 25°C. Em 2008 o Serviço Florestal Brasileiro concedeu 96 mil hectares da área para exploração florestal, divididos em três Unidades de Manejo Florestal (UMF). No mês de setembro de 2010 foi iniciada a exploração nas primeiras Unidades de Produção Anual (UPA).

#### **3.3.2. Dados utilizados**

A verdade de campo foi extraída do conjunto de parcelas permanentes, instaladas e medidas, pelos concessionários do SFB. Foram utilizadas apenas as parcelas permanentes que possuíam sobreposição com a cobertura de dados LiDAR disponível. A localização espacial destas parcelas foi obtida, também pelo concessionário, com o uso de equipamento GNSS de navegação. No total foram consideradas 30 parcelas permanentes localizadas na Unidade de Manejo Florestal I, da Floresta Nacional do Jamari (Tabela 3.1 e Figura 3.1), sendo 14 parcelas medidas antes da exploração florestal e 16 após.

Cada uma destas parcelas, de formato quadrado com dimensões de 50x50 metros, possui o registro de todos os indivíduos arbóreos com DAP superior a 10 centímetros. O maior valor de área basal encontrado é foi de 30,45 m<sup>2</sup>/ha enquanto que o menor valor foi de 13,62 m<sup>2</sup>/ha.

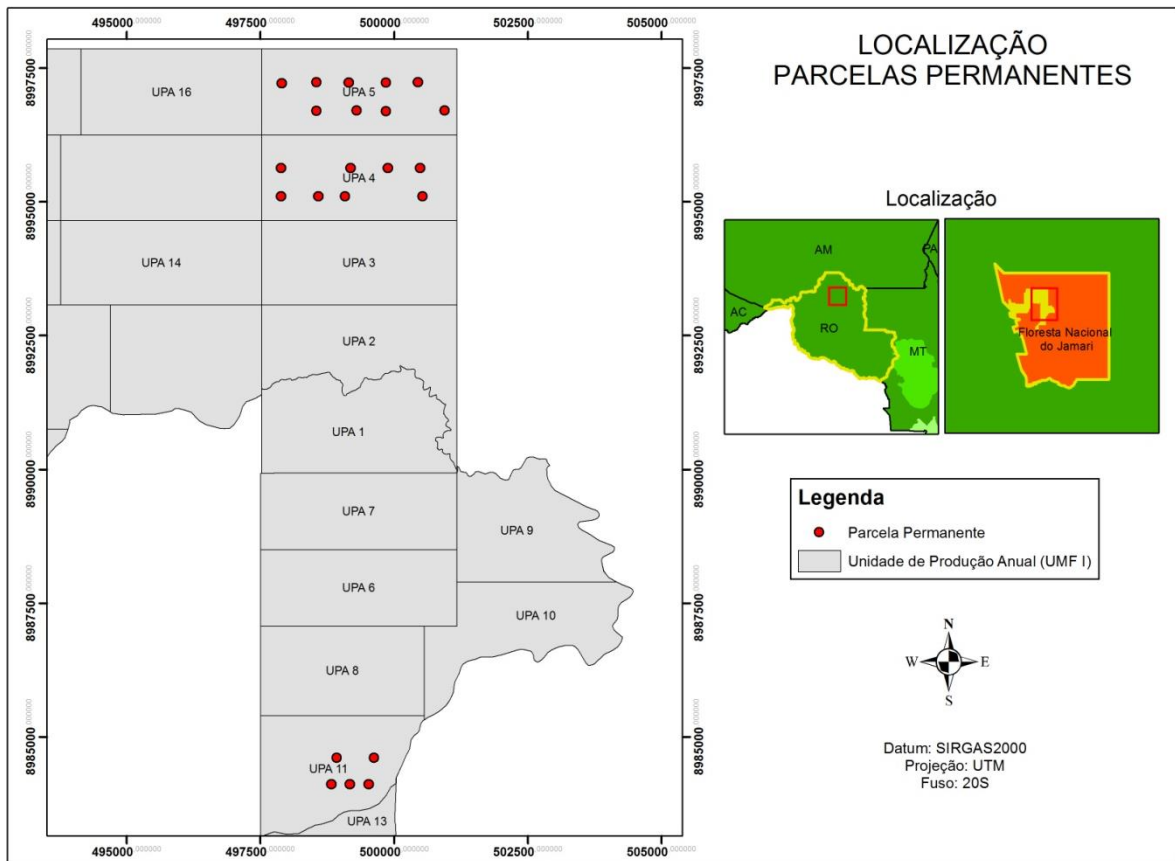
Também foram utilizados os dados referentes ao Inventário 100%, realizado para cada uma das Unidades de Produção Anual (UPA) exploradas, dados estes produzidos pelas empresas concessionárias obedecendo as diretrizes técnicas para apresentação de Plano de

Manejo Florestal Sustentável e Plano Operacional Anual, contidas na Norma de Execução N.º 1/2007 do IBAMA (IBAMA, 2007), e disponibilizados em formato de planilha eletrônica \*.xls e arquivo vetorial (*shapefile*).

**Tabela 3.1.** Características das parcelas permanentes utilizadas neste estudo

Código da área	UPA	Ano exploração	Ano medição	Coleta LiDAR	Long	Lat	Área Basal (m <sup>2</sup> /ha)
01	5	2014	2013	2013	-62,991	-9,076	26,98
02	5	2014	2013	2013	-63,001	-9,076	25,26
03	5	2014	2013	2013	-63,006	-9,076	21,03
04	5	2014	2013	2013	-63,013	-9,076	23,42
05	5	2014	2013	2013	-63,019	-9,072	23,58
06	5	2014	2013	2013	-63,013	-9,072	21,88
07	5	2014	2013	2013	-63,008	-9,072	30,45
08	5	2014	2013	2013	-63,001	-9,072	28,82
09	5	2014	2013	2013	-62,996	-9,072	22,22
10*	4	2013	2014	2013	-63,019	-9,086	21,18
11*	4	2013	2014	2013	-63,019	-9,091	26,27
12*	4	2013	2014	2013	-63,013	-9,091	18,60
13*	4	2013	2014	2013	-63,008	-9,091	17,58
14*	4	2013	2014	2013	-63,007	-9,086	19,96
15*	4	2013	2014	2013	-63,001	-9,086	17,43
16*	4	2013	2014	2013	-62,995	-9,091	25,69
17*	4	2013	2014	2013	-62,996	-9,086	28,50
18	11	2015	2014	2014	-63,011	-9,190	14,90
19	11	2015	2014	2014	-63,008	-9,190	16,35
20	11	2015	2014	2014	-63,004	-9,190	26,67
21	11	2015	2014	2014	-63,003	-9,186	16,88
22	11	2015	2014	2014	-63,010	-9,186	18,55
23*	5	2014	2015	2015	-63,001	-9,076	23,94
24*	5	2014	2015	2015	-63,001	-9,072	26,11
25*	5	2014	2015	2015	-62,996	-9,072	22,67
26*	11	2015	2016	2015	-63,011	-9,190	13,62
27*	11	2015	2016	2015	-63,008	-9,190	15,47
28*	11	2015	2016	2015	-63,004	-9,190	25,35
29*	11	2015	2016	2015	-63,003	-9,186	17,91
30*	11	2015	2016	2015	-63,010	-9,186	18,60
<b>Média</b>							<b>21,86</b>
<b>± Desvio Padrão</b>							<b>± 4,57</b>

\* Medição realizada após exploração florestal.

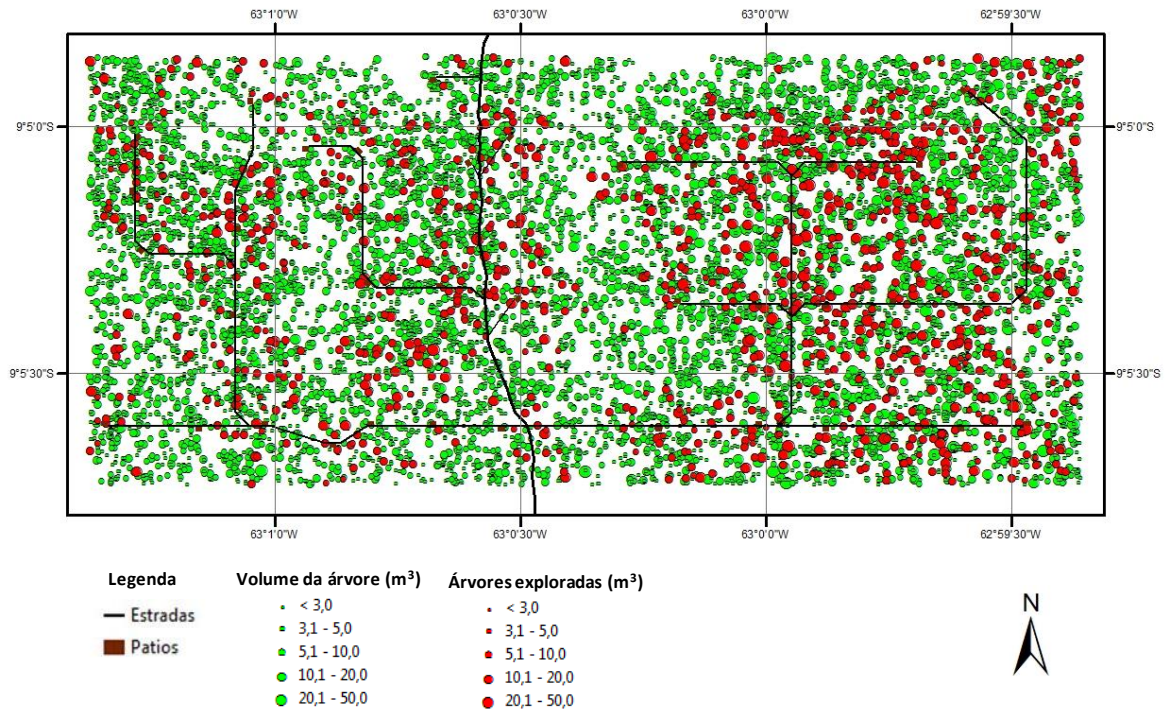


**Figura 3.1.** Localização e distribuição espacial das parcelas permanentes utilizadas neste estudo.

Os dados volumétricos da madeira explorada para cada uma das UPAs foram obtidos pelos concessionários após a exploração da área, a medição das toras segue o Guia para Medição de Produtos e Subprodutos Florestais Madeireiros das Concessões Florestais (SFB, 2012). Estes dados são registrados no Sistema de Cadeia de Custódia pelas empresas concessionárias, e acessado via internet por usuários autorizados pelo SFB (Figura 3.2).

O conjunto de dados LiDAR utilizados neste estudo foram coletados nos anos de 2013, 2014 e 2015 (Tabela 3.2). Os dados foram disponibilizados na forma de nuvem de pontos com extensão \*.las e acompanhados do Modelo Digital do Terreno (MDT) dela derivado, com um metro de resolução espacial. A projeção e sistema de referência adotados para Flona Jamari foi UTM, fuso 20 S e Datum SIRGAS 2000.





**Figura 3.2.** Croqui contendo a espacialização da infraestrutura de exploração e das árvores inventariadas e abatidas. Fonte: Sistema de Cadeia de Custódia do SFB. UMF I, UPA 4, Flona do Jamari/RO.

**Tabela 3.2.** Especificação técnica das coletas de dados LiDAR

Especificações	Coleta 2013	Coleta 2014	Coleta 2015
Sensor LiDAR	Optech, Orion	Trimble, Harrier 68i	LaserScan, Optech 3100
Altitude voo	850 m	500 m	700 m
Ângulo de escaneamento	11°	15°	15°
Frequência de escaneamento	67.5 kHz	360 kHz	55 kHz
Sobreposição lateral	65%	65%	70%
Densidade média de retornos	32,9 ppm <sup>2</sup>	49,6 ppm <sup>2</sup>	59,2 ppm <sup>2</sup>

### 3.3.3. Processamento dos dados

#### 3.3.3.1. Processamento LiDAR

O processamento das nuvens de pontos e dos modelos de terreno foi executado no pacote FUSION (McGAUGHEY, 2010), e o processamento das métricas derivadas realizado no

pacote ArcGIS (ESRI, 2012). Os arquivos do MDT foram convertidos do formato grid para o formato \*.ascii e em seguida, para o formato \*.dtm, nativo do pacote FUSION. A altitude do terreno derivada do MDT é subtraída de cada retorno para remover a influência da topografia sobre a altura da floresta.

O processador LTK Processor do FUSION foi utilizado para processar o conjunto de múltiplos tiles (no formato \*.las) de cada área de estudo. O resultado de cada processamento do LTK consiste em um conjunto de superfícies matriciais em resolução espacial definida pelo usuário, contendo métricas de densidade, elevação e intensidade (McGAUGHEY, 2010).

O comando *Clipplots* do FUSION foi utilizado para realizar o recorte da nuvem de pontos coincidente com cada uma das parcelas permanentes utilizadas. Na sequência foi utilizado o comando *Cloudmetrics* para o cálculo de uma variedade de parâmetros estatísticos que descrevem a nuvem de pontos LiDAR para cada uma das parcelas. O arquivo resultante desse processamento possui formato \*.csv. O conjunto de variáveis extraídas da nuvem de pontos, consideradas neste estudo, está descrito na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3.** Variáveis estatísticas extraídas da nuvem de pontos LiDAR, utilizadas neste estudo.

<b>Categoria</b>	<b>Descrição (código)</b>
Altura	Máxima (Elev.max)
	Média (Elev.mean)
	Moda (Elev.mode)
	Desvio padrão (Elev.stddev)
	Variância (Elev.variance)
	Coefficiente de variação (Elev.CV)
	Distância interquartil (Elev.IQ)
	Assimetria/obliquidade (Elev.skewness)
	Curtose (Elev.kurtosis)
	Percentis 5º, 10º, 20º, 25º, 30º, 40º, 50º, 60º, 70º, 75º, 80º, 90º, 95º, 99º (Elev.Px)
Proporção	[altura média – altura mínima/altura máxima – altura mínima] (Canopy relief ratio)
	Modelo de densidade relativa do sub-bosque (RDM)

### 3.3.3.2. Processamento dos dados de campo

Como nas parcelas permanentes instaladas nas áreas sob concessão florestal nem sempre está presente a informação de altura do indivíduo, foi necessária a conversão da

informação de DAP para volume do fuste utilizando uma equação de simples entrada. Optou-se por utilizar a Equação (3.1) desenvolvida por Nogueira et al. (2008) pois a mesma foi gerada para uma região que contempla a área de interesse deste estudo. O melhor ajuste encontrado por Nogueira et al. (2008), considerando equação com entrada de variável única, apenas o DAP, foi a seguinte:

$$\ln[V] = -8,939 + 2,507 \cdot \ln[DAP] \quad (3.1)$$

Sendo  $V$  = volume do fuste em metros cúbicos e  $DAP$  = Diâmetro na Altura do Peito em centímetros. Fonte: Nogueira et al. (2008).

Considerando a limitação da equação de Nogueira (2008) para estimar o volume das árvores com DAP muito grande, foram utilizados os dados de volume de fuste do Inventário Florestal 100% para as árvores com DAP superior a 200 cm. O resultado de volume de fuste de cada uma das árvores foi agregado por parcela, considerando que a parcela possui dimensões de 50x50m, ou seja,  $\frac{1}{4}$  de hectare, o volume total de fuste de cada parcela foi multiplicado por quatro para conversão da unidade de  $m^3$ /parcela para  $m^3$ /ha.

#### 3.3.3.3. Combinação dos dados e modelagem estatística

Foi construída uma planilha eletrônica associando as informações de área basal e volume de fuste de cada uma das parcelas permanentes com as informações referentes as variáveis estatísticas derivadas da nuvem de pontos LiDAR utilizando o programa MS EXCEL.

Esse conjunto de informações foi inserido no programa computacional R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012) para a execução de regressões lineares. As variáveis preditoras derivadas do LiDAR foram selecionadas utilizando os melhores subconjuntos (R PACKAGE 'LEAPS', LUMLEY, 2009) apresentados pelo processamento no R. Assim foi ajustado um modelo que estima a área basal e outro que estima volume de fuste a partir de dados LiDAR.

A partir das regressões realizadas foram identificados os melhores conjuntos de variáveis para modelos com diferentes graus de complexidade, desde modelos com uma variável de entrada até oito. A seleção do modelo mais adequado foi realizada utilizando os resultados do teste de significância F, foi considerado como mais adequado o modelo de menor

complexidade que melhor explicasse o fenômeno avaliado, ou seja, a inclusão de uma variável (aumento da complexidade) no modelo só é tolerada se a mesma representar aumento significativo ( $p\text{-valor} \leq 0,001$ ) da sua capacidade de explicação do fenômeno (BOLKER, 2007).

Os dados foram avaliados quanto ao pressuposto de normalidade e homogeneidade de variâncias pela análise gráfica dos resíduos, autocorrelação pelo teste de Durbin-Watson ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ), homoscedasticidade pelo teste de Breusch-Pagan ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ). Em seguida, os modelos foram avaliados pelo desempenho dos parâmetros estatísticos da regressão, como Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ), Raiz do erro quadrático médio (RMSE) e significância, via teste F (BOX et al., 2005).

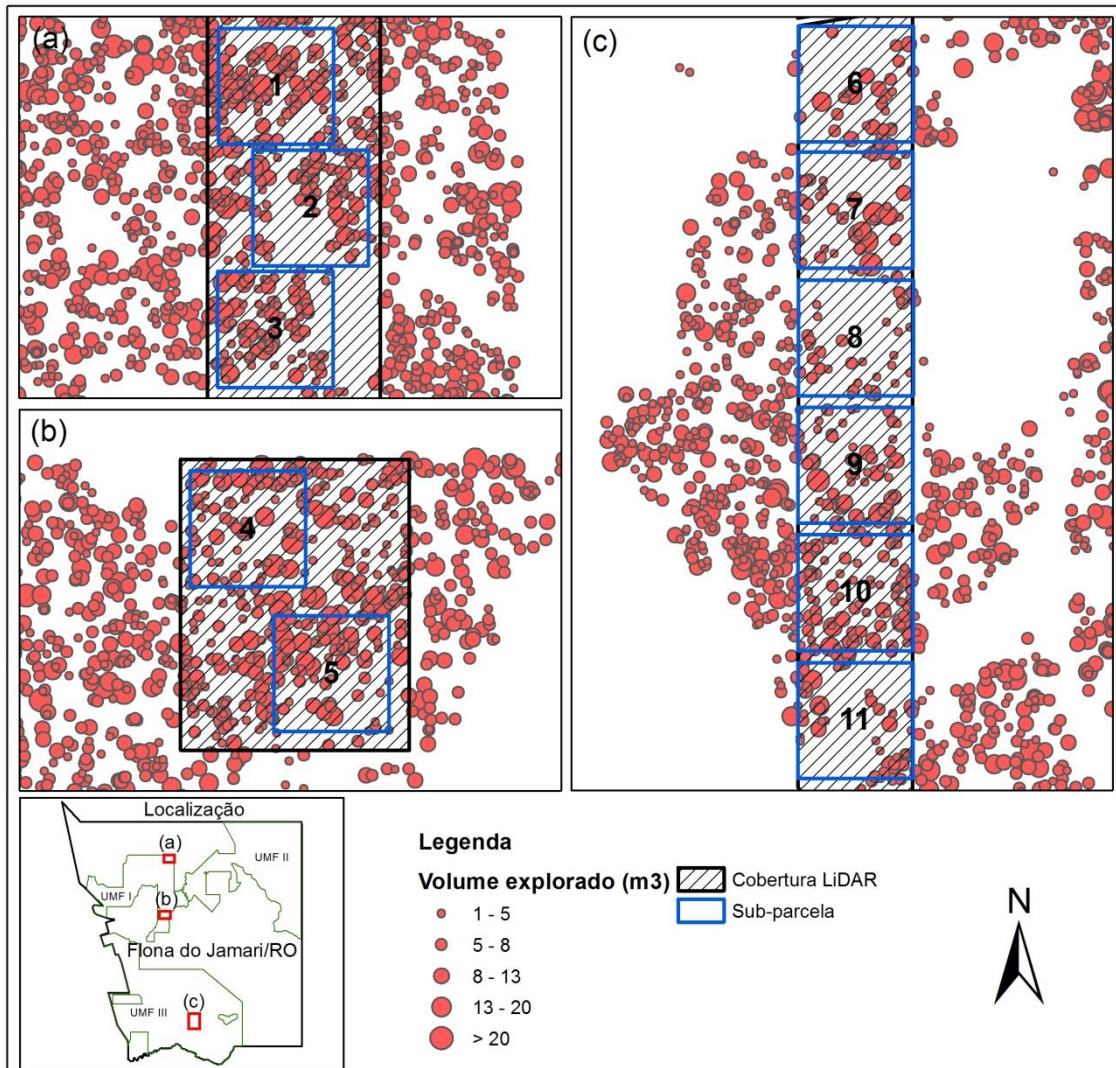
Para evitar a seleção de modelos com indícios de multicolinearidade foi realizada a análise de significância dos coeficientes do modelo, o indício mais evidente da multicolinearidade é um elevado valor do coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ), seguido de coeficientes do modelo não significativos estatisticamente (VALENTE et al., 2011). Neste estudo, optou-se por eliminar os modelos com coeficientes não significativos ( $p\text{-valor} \leq 0,001$ ).

#### 3.3.3.4. Aplicação do modelo de volume de fuste

O modelo para predição do volume de fuste obtido, foi aplicado nas três áreas da Flona do Jamari que possuíam cobertura LiDAR multitemporal, utilizando a ferramenta *Raster calculator* do ArcGIS. A partir desse processamento foram obtidas as imagens com o volume de fuste antes e após a exploração florestal, todas com resolução espacial de 50 metros. Para obtenção da imagem que representa a intensidade de exploração (volume de fuste explorado por hectare) foi realizado o cálculo da diferença entre as imagens de volume antes e após a exploração, para este cálculo também foi realizado utilizando a ferramenta *Raster calculator* do ArcGIS.

Foram criadas e distribuídas 11 parcelas virtuais (Figura 3.3), de 25 hectares (500x500m), sobre as três áreas com cobertura LIDAR multitemporal da Flona do Jamari/RO. Destas 11 parcelas, 06 estão localizadas em uma área que não foi utilizada na construção do modelo e, portanto servem como local para validação do mesmo. Para cada uma destas parcelas foram associadas as informações de volume de fuste explorado, predito pelo

modelo, e dados do volume de fuste explorado obtidos em campo, disponibilizados via Sistema de Cadeia de Custódia do SFB.



**Figura 3.3.** Distribuição das parcelas virtuais (polígonos azuis) sobre as áreas com cobertura LiDAR multitemporal e árvores exploradas via manejo florestal sustentável.

Os valores de volume de fuste explorado, preditos e observados, foram então comparados para obtenção do valor de diferença média. O teste t, para amostras pareadas, foi realizado para avaliar se há diferença estatística significativa ( $\alpha = 0,05$ ), entre os valores preditos e observados.

Para identificar o percentual de sobreposição das árvores exploradas, coletadas com GNSS de navegação, com as áreas que apresentaram redução do volume de fuste, estimado com dados LiDAR, foi realizada a intersecção entre ambos os produtos utilizando a ferramenta *Extract Multi Values to Points* do ArcGIS.

### 3.4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.4.1. Estimativa do volume de fuste

As parcelas de campo que tiveram seu volume de fuste estimado com auxílio da equação alométrica de Nogueira et al. (2008) estão descritas na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4.** Estimativa do volume de fuste para as parcelas permanentes deste estudo

Código da área	UPA	Ano exploração	Ano medição	Ano LiDAR	Long	Lat	Volume (m <sup>3</sup> /ha)
01	5	2014	2013	2013	-62,991	-9,076	304,56
02	5	2014	2013	2013	-63,001	-9,076	320,35
03	5	2014	2013	2013	-63,006	-9,076	228,80
04	5	2014	2013	2013	-63,013	-9,076	234,09
05	5	2014	2013	2013	-63,019	-9,072	233,57
06	5	2014	2013	2013	-63,013	-9,072	272,85
07	5	2014	2013	2013	-63,008	-9,072	369,80
08	5	2014	2013	2013	-63,001	-9,072	321,32
09	5	2014	2013	2013	-62,996	-9,072	225,02
10*	4	2013	2014	2013	-63,019	-9,086	198,78
11*	4	2013	2014	2013	-63,019	-9,091	265,55
12*	4	2013	2014	2013	-63,013	-9,091	186,85
13*	4	2013	2014	2013	-63,008	-9,091	144,30
14*	4	2013	2014	2013	-63,007	-9,086	181,07
15*	4	2013	2014	2013	-63,001	-9,086	184,72
16*	4	2013	2014	2013	-62,995	-9,091	290,19
17*	4	2013	2014	2013	-62,996	-9,086	383,34
18	11	2015	2014	2014	-63,011	-9,190	148,12
19	11	2015	2014	2014	-63,008	-9,190	146,94
20	11	2015	2014	2014	-63,004	-9,190	271,63
21	11	2015	2014	2014	-63,003	-9,186	190,72
22	11	2015	2014	2014	-63,010	-9,186	166,60
23*	5	2014	2015	2015	-63,001	-9,076	303,60
24*	5	2014	2015	2015	-63,001	-9,072	292,02
25*	5	2014	2015	2015	-62,996	-9,072	234,31
26*	11	2015	2016	2015	-63,011	-9,190	130,38
27*	11	2015	2016	2015	-63,008	-9,190	138,49
28*	11	2015	2016	2015	-63,004	-9,190	255,44
29*	11	2015	2016	2015	-63,003	-9,186	213,34
30*	11	2015	2016	2015	-63,010	-9,186	167,71
<b>Média ± Desvio Padrão</b>							<b>233,48 ± 69,34</b>

\* Parcelas medidas após exploração florestal.

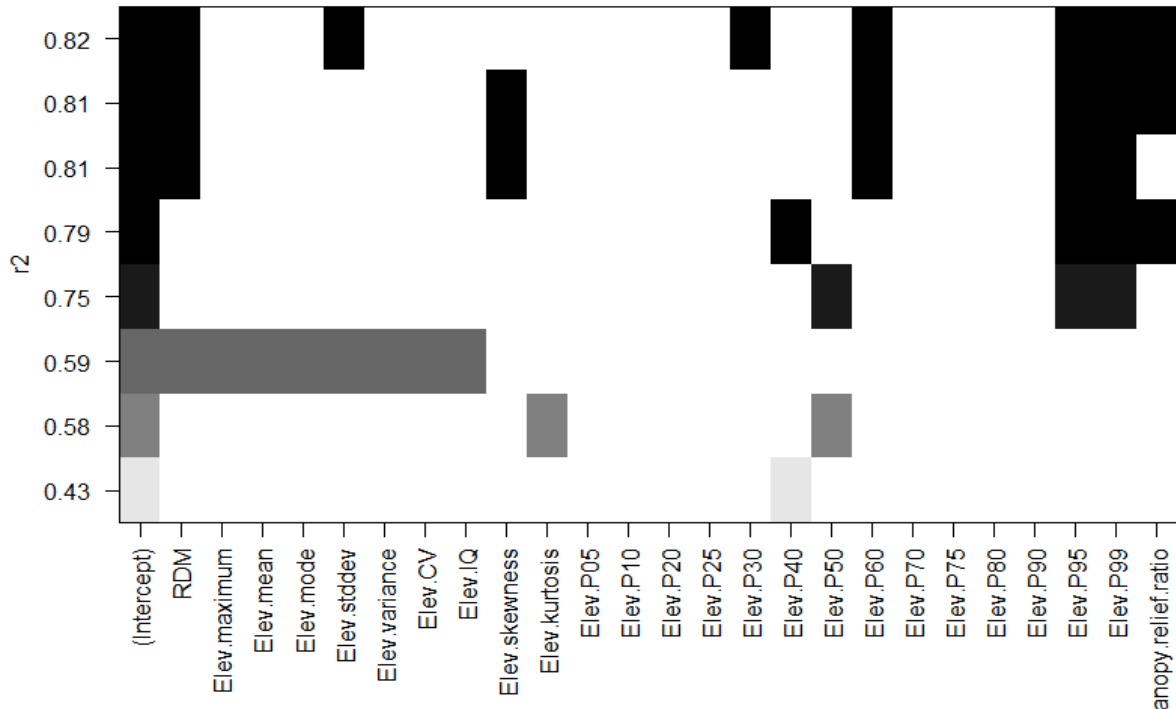


O maior volume encontrado foi de 383,34 m<sup>3</sup>/ha e o menor 130,38 m<sup>3</sup>/ha, o volume de fuste médio é de 233,48 ± 69,34 m<sup>3</sup>/ha. Os valores encontrados para as parcelas deste estudo são compatíveis aos valores de volume de fuste identificados em outros estudos na Amazônia, D’Oliveira et al. (2012) encontrou 194,5 ± 53,9 m<sup>3</sup>/ha para a Floresta Estadual do Antimary no Acre, já Higuchi (2015) estimou em 291,8 ± 41,8 m<sup>3</sup>/ha o volume para as florestas primárias de terra firme do estado do Amazonas.

Apesar da equação alométrica utilizada para estimativa do volume de fuste ser adequada para uso na região de estudo, deve ser considerada como uma limitação deste estudo a acurácia desta estimativa. Esta fonte de incerteza no desenvolvimento do modelo foi aceita visto a inexistência de uma verdade de campo para esta informação.

### 3.4.2. Ajuste do modelo para área basal

Utilizando o pacote *Leaps* do programa R foi executada uma busca exaustiva dos melhores subconjuntos de variáveis em “x”, dados LiDAR, para prever “y”, área basal, através de regressão linear. Na Figura 3.4 é apresentado o resultado de ajuste dos diferentes subconjuntos de variáveis, com modelos lineares de diferentes complexidades, desde modelos com apenas uma variável de entrada até modelos de oito variáveis.



**Figura 3.4.** Representação do ajuste da regressão linear considerando modelos lineares de diferente complexidade para estimativa da área basal.

Foi selecionado o modelo de 03 variáveis, pois, de acordo com o teste de significância F, Tabela 3.5, é o modelo de menor complexidade que melhor explica o fenômeno. A significância do modelo, após a inclusão de uma quarta variável, cai drasticamente, o que significa que a inclusão desta variável, aumenta a complexidade do modelo sem aumentar significativamente sua capacidade de explicação do fenômeno (BOLKER, 2007).

**Tabela 3.5.** Análise de variância para comparação dos diferentes modelos de regressão linear gerados para estimar a área basal

Nº	Modelo	Res.gl	Res.SQ	SQ	F	Pr(>F)
1	AB ~ Elev.P40	28	347,10			
2	AB ~ Elev.kurtosis + Elev.P50	27	254,17	92,94	19,04	0,0002***
<b>3</b>	<b>AB ~ Elev.P50 + Elev.P95 + Elev.P99</b>	<b>26</b>	<b>148,66</b>	<b>105,51</b>	<b>21,61</b>	<b>0,0001***</b>
4	AB ~ Elev.P40 + Elev.P95 + Elev.P99 + Canopy.relief.ratio	25	129,26	19,40	3,97	0,0582 .
5	AB ~ RDM + Elev.skewness + Elev.P60 + Elev.P95 + Elev.P99	24	117,59	11,67	2,30	0,1357
6	AB ~ RDM + Elev.skewness + Elev.P60 + Elev.P95 + Elev.P99 + Canopy.relief.ratio	23	112,28	5,31	1,09	0,3077

Códigos de significância: 0 ‘\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*’ 0,01 ‘\*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘ ’ 1

Na Tabela 3.6 é apresentado o resumo de desempenho estatístico dos modelos testados, com destaque ao modelo selecionado, com três variáveis.

**Tabela 3.6.** Resumo da estatística dos diferentes modelos de regressão linear gerados para área basal

Modelo	RMSE	RSE	R <sup>2</sup>	R <sub>aj</sub> <sup>2</sup>	F	valor-p
1	3,40	3,52	0,43	0,40	3,5 com 1 e 28 gl	9,221e-05
2	2,91	3,07	0,58	0,55	18,6 com 2 e 27 gl	8,249e-06
<b>3</b>	<b>2,23</b>	<b>2,39</b>	<b>0,75</b>	<b>0,72</b>	<b>26,6 com 3 e 26 gl</b>	<b>4,385e-08</b>
4	2,07	2,27	0,79	0,75	23,0 com 4 e 25 gl	4,539e-08
5	1,98	2,21	0,80	0,76	19,9 com 5 e 24 gl	7,855e-08
6	1,93	2,21	0,81	0,77	16,8 com 6 e 23 gl	2,254e-07



O modelo selecionado pode ser considerado satisfatório, visto que apresentou bons resultados estatísticos como  $R_{aj}^2$  de 0,72 e RMSE de 2,23 m<sup>2</sup>/ha. D'Oliveira et al. (2012), também utilizando dados LiDAR, obteve modelo para predição da área basal da Floresta Estadual do Antimary no Acre, com duas variáveis Percentil 25º e Variância da altura, com  $R^2$  de 0,63 e RMSE de 3,18 m<sup>2</sup>/ha. Outro ponto positivo a ser considerado no presente modelo é sua amplitude de aplicação, como foram consideradas parcelas medidas em áreas com e sem exploração seletiva de madeira, os valores de área basal variaram de 13,62 m<sup>2</sup>/ha a 30,45 m<sup>2</sup>/ha.

A Equação (3.2) descreve o modelo para estimativa da área basal selecionado. Na Tabela 3.7 é apresentado um resumo da análise de significância dos coeficientes do modelo selecionado. Considerando que todos os coeficientes do modelo são significativos (p-valor  $\leq 0,001$ ), a hipótese de multicolinearidade é rejeitada.

$$AB = 6,4103 + 1,2829 \times Elev.P50 - 1,1205 \times Elev.P95 + 0,7501 \times Elev.P99 \quad (3.2)$$

Sendo AB = área basal em metros quadrados por hectares, Elev.P50 = Percentil 50 da altura em metros, Elev.P95 = Percentil 95 da altura em metros, Elev.P99 = Percentil 99 da altura em metros.

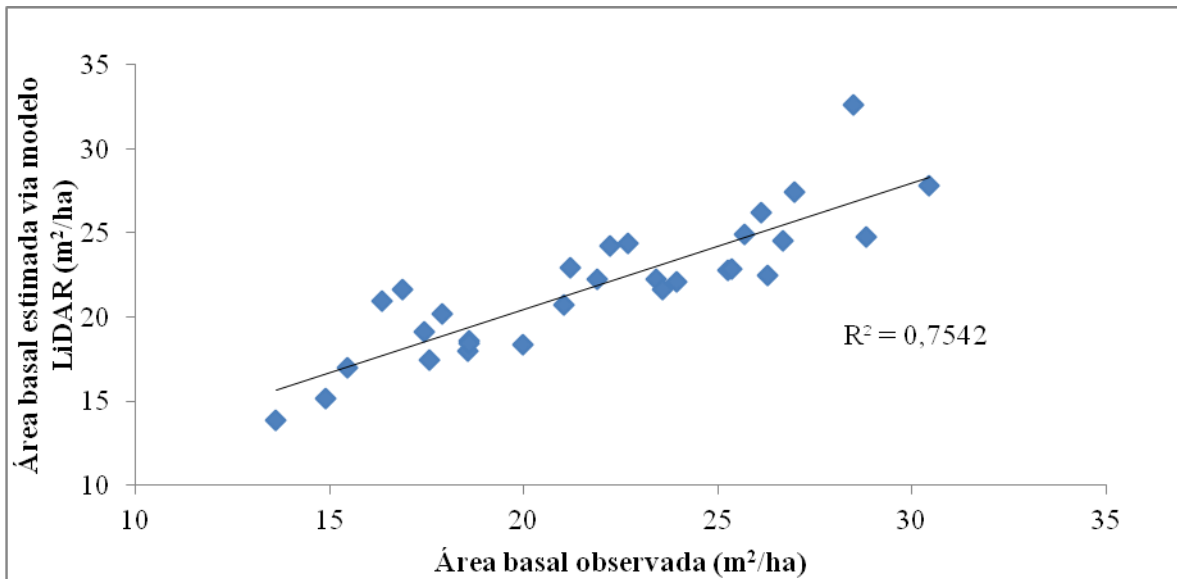
**Tabela 3.7.** Resumo da análise de significância dos coeficientes do modelo de regressão linear para área basal

Variável	Coefficiente	Erro padrão	stat t	valor-P
Interseção	6,4103	2,9299	2,188	0,0379 *
Elev.P50	1,2829	0,1595	8,041	1,61e-08 ***
Elev.P95	-1,1205	0,1850	-6,058	2,12e-06 ***
Elev.P99	0,7501	0,1456	5,152	2,25e-05 ***

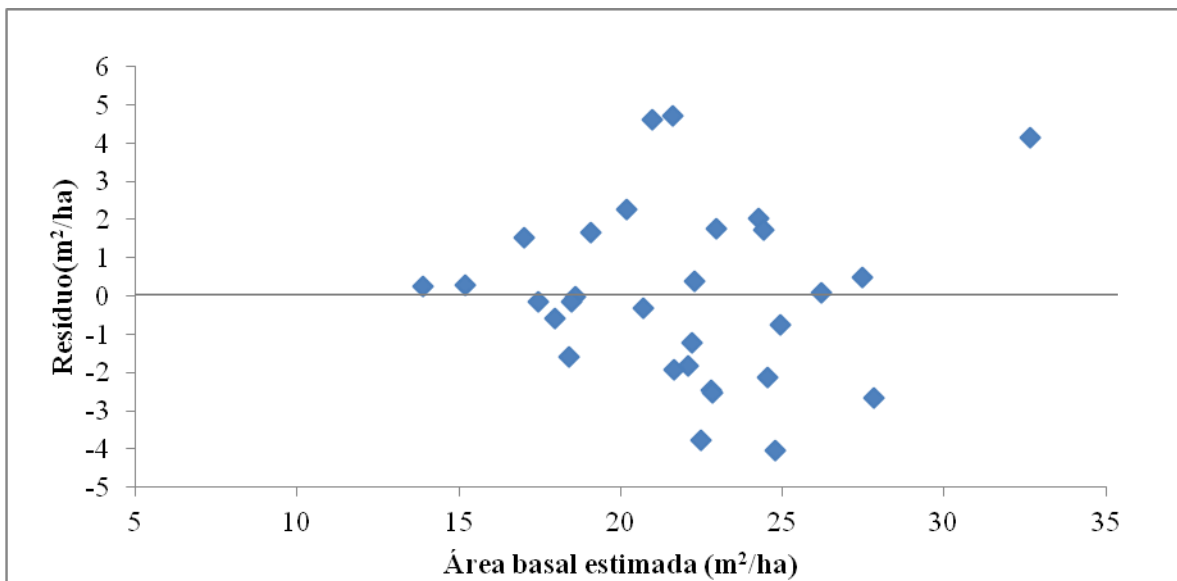
Códigos de significância: 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

A análise gráfica do ajuste do modelo (Figura 3.5) confirma que os valores estimados se aproximam dos valores observados. Baseado na análise do gráfico de resíduos, Figura 3.6, não é possível identificar tendência de super ou subestimativa ao longo da amplitude de área basal, corroborando com o pressuposto de que os erros são aleatórios, de média zero e variância equivalente. O teste de identidade de modelos Durbin-Watson teve como resultado 2,28 (p-valor = 0,72), uma vez que o p-valor é maior do que 0,05, não há

indicação de autocorrelação serial nos resíduos do modelo. O mesmo vale para o teste de homoscedasticidade de Breusch-Pagan que teve como resultado 4,27 (p-valor = 0,23) também com p-valor superior a 0,05, permitindo rejeitar a hipótese de heterocedasticidade.

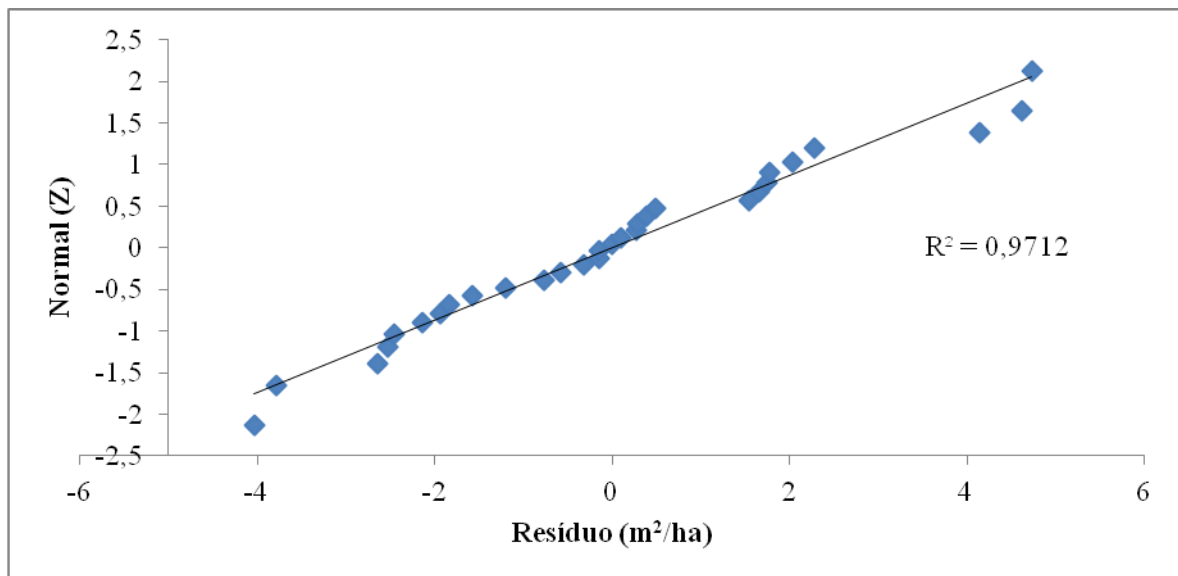


**Figura 3.5.** Valores preditos pelo modelo que utiliza as variáveis explanatórias LiDAR plotados contra valores observados nas parcelas de campo para área basal.



**Figura 3.6.** Distribuição gráfica dos resíduos do modelo de área basal.

Baseado na distribuição de probabilidade normal (Figura 3.7), não se rejeita a hipótese de normalidade dos dados, pois os valores dos resíduos se aproximam de uma linha reta quando plotados contra uma escala de probabilidade normal (BOX et al., 2005).



**Figura 3.7.** Distribuição da probabilidade normal para os dados de área basal.

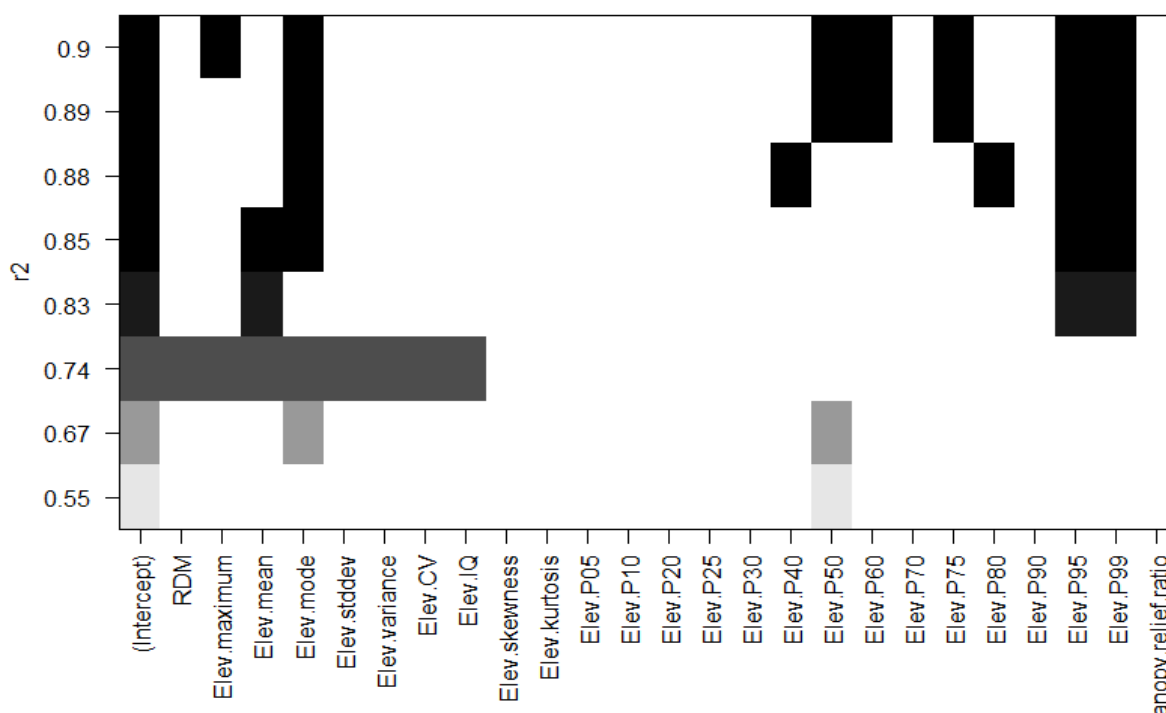
### 3.4.3. Ajuste do modelo para volume de fuste

Utilizando o pacote *Leaps* do programa R foi executada uma busca exaustiva dos melhores subconjuntos de variáveis em “x”, dados LiDAR, para prever “y”, volume de fuste, através de regressão linear. Na Figura 3.8 é apresentado o resultado de ajuste dos diferentes subconjuntos de variáveis, com modelos lineares de diferentes complexidades, desde modelos com apenas uma variável de entrada até modelos de oito variáveis.

Foi selecionado o modelo de 03 variáveis, pois, de acordo com o teste de significância F, Tabela 3.8, é o modelo de menor complexidade que melhor explica o fenômeno. A significância do modelo, após a inclusão de uma quarta variável, cai drasticamente, o que significa que a inclusão desta variável, aumenta a complexidade do modelo sem aumentar significativamente sua capacidade de explicação do fenômeno (BOLKER, 2007).

Na Tabela 3.9 é apresentado o resumo de desempenho estatístico dos modelos testados, com destaque ao modelo selecionado, com três variáveis. O modelo selecionado pode ser considerado satisfatório, visto que apresentou bons resultados estatísticos como  $R_{aj}^2$  de 0,83 e RMSE de 27,7 m<sup>3</sup>/ha. D’Oliveira et al. (2012), também utilizando dados LiDAR, obteve modelo para predição da volume de fuste da Floresta Estadual do Antimary no Acre, com duas variáveis, Percentil 25º e Variância da altura, com  $R^2$  de 0,69 e RMSE de 30,48 m<sup>3</sup>/ha. Outro ponto positivo a ser considerado no presente modelo é sua amplitude de aplicação, como foram consideradas parcelas medidas em áreas com e sem exploração

seletiva de madeira, os valores de volume de fuste variaram de 130,38 m<sup>3</sup>/ha a 383,34 m<sup>3</sup>/ha.



**Figura 3.8.** Representação do ajuste da regressão linear considerando modelos lineares de diferente complexidade para estimativa do volume de fuste.

**Tabela 3.8.** Análise de variância para comparação dos diferentes modelos de regressão linear gerados para estimar o volume de fuste

Nº	Modelo	Res.gl	Res.SQ	SQ	F	Pr(>F)
1	VF ~ Elev.P50	28	62.105			
2	VF ~ Elev.mode + Elev.P50	27	46.153	15.951,5	24,08	5,88e-05 ***
<b>3</b>	<b>VF ~ Elev.mean + Elev.P95 + Elev.P99</b>	<b>26</b>	<b>23.014</b>	<b>23.138,9</b>	<b>34,92</b>	<b>5,04e-06 ***</b>
4	VF ~ Elev.mean + Elev.mode + Elev.P95 + Elev.P99	25	20.343	2.671,8	4,03	0,0565 .
5	VF ~ Elev.mode + Elev.P40 + Elev.P80 + Elev.P95 + Elev.P99	24	16.858	3.484,4	5,26	0,0313 *
6	VF ~ Elev.mode + Elev.P50 + Elev.P60 + Elev.P75 + Elev.P95 + Elev.P99	23	15.239	1.619,5	2,44	0,1316

Códigos de significância: 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

**Tabela 3.9.** Resumo da estatística dos diferentes modelos de regressão linear gerados para volume de fuste

Modelo	RMSE	RSE	R <sup>2</sup>	R <sub>aj</sub> <sup>2</sup>	F	valor-p
1	45,50	47,10	0,55	0,54	34,87 com 1 e 28 gl	2,364e-06
2	39,22	41,34	0,67	0,64	27,29 com 2 e 27 gl	3,291e-07
<b>3</b>	<b>27,70</b>	<b>29,75</b>	<b>0,83</b>	<b>0,81</b>	<b>43,84 com 3 e 26 gl</b>	<b>2,596e-10</b>
4	26,04	28,53	0,85	0,83	36,59 com 4 e 25 gl	4,144e-10
5	23,70	26,50	0,88	0,85	34,90 com 5 e 24 gl	2,960e-10
6	22,53	25,74	0,89	0,86	31,24 com 6 e 23 gl	5,991e-10

A Equação (3.3) descreve o modelo para estimativa do volume de fuste selecionado. Na Tabela 3.10 é apresentado um resumo da análise de significância dos coeficientes do modelo selecionado. Considerando que todos os coeficientes do modelo são significativos (p-valor  $\leq 0,001$ ), a hipótese de multicolinearidade é rejeitada.

$$VF = -109,79 + 25,79 \times Elev. mean - 17,884 \times Elev. P95 + 11,826 \times Elev. P99 \quad (3.3)$$

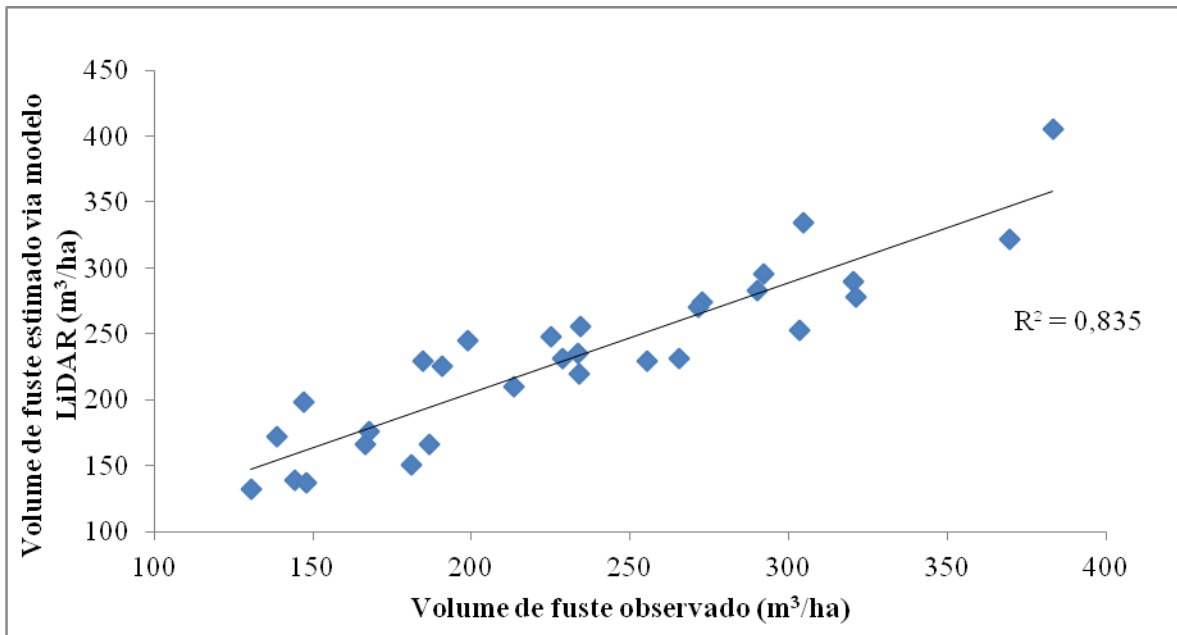
Sendo VF = volume do fuste em metros cúbicos por hectares, Elev.mean = Altura média em metros, Elev.P95 = Percentil 95 da altura em metros, Elev.P99 = Percentil 99 da altura em metros.

**Tabela 3.10.** Resumo da análise de significância dos coeficientes do modelo de regressão linear para volume de fuste

Variável	Coefficiente	Erro padrão	stat t	valor-P
Interseção	-109,790	37,231	-2,949	0,00666 **
Altura média	25,790	2,809	9,182	1,21e-09 ***
Percentil 95	-17,884	2,550	-7,013	1,90e-07 ***
Percentil 99	11,826	1,814	6,518	6,55e-07 ***

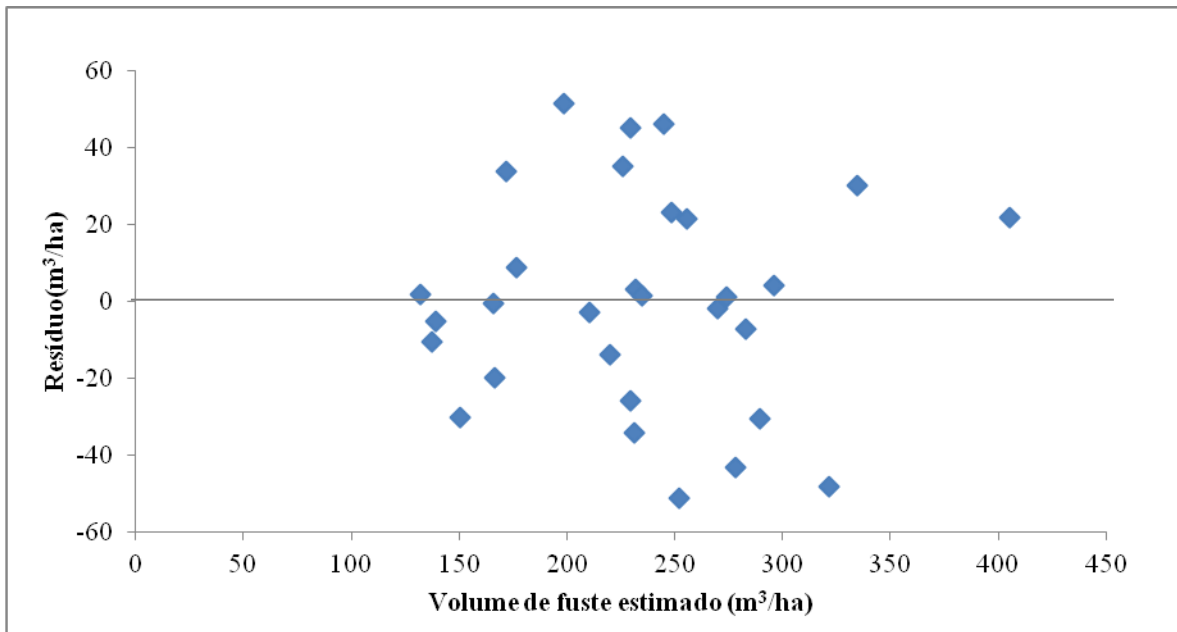
Códigos de significância: 0 ‘\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*’ 0,01 ‘\*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘ ’ 1

O ajuste do modelo, de acordo com a análise gráfica (Figura 3.9), confirma que os valores estimados se aproximam dos valores observados. Não houve saturação nos valores de volume acima de 300 m<sup>3</sup>/ha como acontece com modelos derivados de outros sensores, como RADAR (NGUYEN et al., 2016).



**Figura 3.9.** Valores preditos pelo modelo que utiliza as variáveis explanatórias LiDAR plotados contra valores observados nas parcelas de campo para volume de fuste.

Baseado na análise do gráfico de resíduos, Figura 3.10, não é possível identificar tendência de super ou subestimativa ao longo da amplitude dos volumes, corroborando com o pressuposto de que os erros são aleatórios, de média zero e variância equivalente.

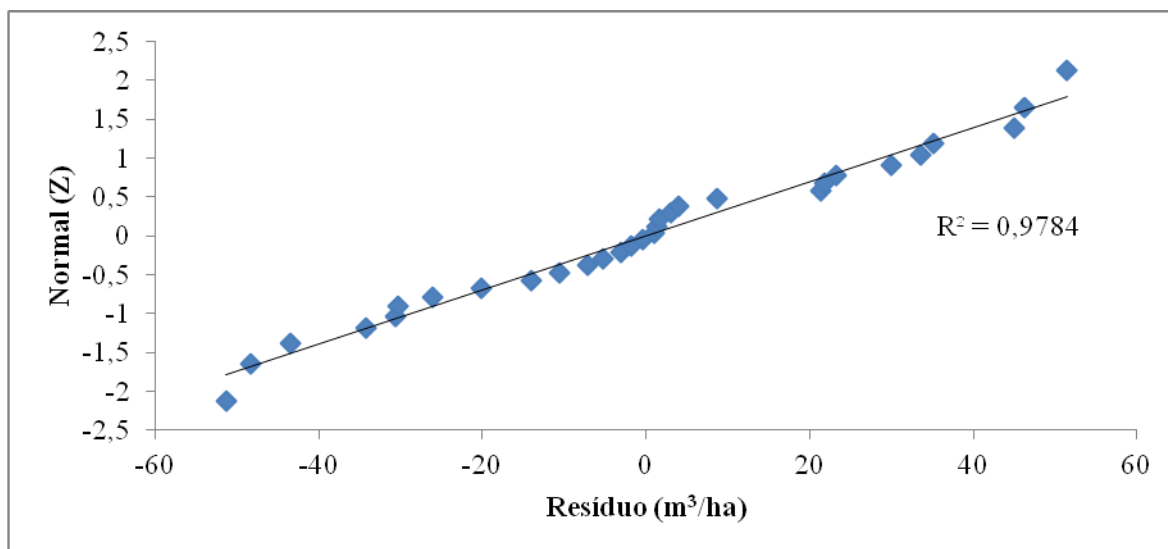


**Figura 3.10.** Distribuição gráfica dos resíduos do modelo de volume de fuste.

O teste de identidade de modelos Durbin-Watson teve como resultado 1,98 (p-valor = 0,4), uma vez que o p-valor é maior do que 0,05, não há indicação de autocorrelação serial nos

resíduos do modelo. O mesmo vale para o teste de homoscedasticidade de Breusch-Pagan que teve como resultado 1,63 (p-valor = 0,65) também com p-valor superior a 0,05, permitindo rejeitar a hipótese de heterocedasticidade.

Baseado na distribuição de probabilidade normal (Figura 3.11), como os valores dos resíduos se aproximam de uma linha reta quando plotados contra uma escala de probabilidade normal, não se rejeita a hipótese de normalidade dos dados (BOX et al., 2005).



**Figura 3.11.** Distribuição da probabilidade normal para os dados de volume de fuste.

#### 3.4.4. Aplicação do modelo

Os resultados para estimar a intensidade de exploração madeireira em Unidades de Produção Anual podem ser considerados satisfatórios, mas devem ser analisados com cuidado, apenas três áreas, subdivididas em 11 parcelas, na Floresta Nacional do Jamari puderam ser analisadas, pois são as únicas áreas deste estudo que possuem dados LiDAR obtidos antes e após a sua exploração. A diferença entre os valores preditos e medidos é da ordem de 4,12 m<sup>3</sup>/ha (Tabela 3.11).

A diferença observada para as parcelas que não contribuíram para a construção do modelo (parcelas 06, 07, 08, 09, 10 e 11) teve comportamento similar as parcelas que contribuíram, 4,13 e 4,11 m<sup>3</sup>/ha respectivamente. Elemento que traz ainda mais robustez quando considerado, é o fato do modelo ter captado a considerável diferença na intensidade de exploração das áreas avaliadas, áreas que contribuíram para construção do modelo tiveram

intensidade de exploração estimada e observada de 23,11 e 20,90 m<sup>3</sup>/ha respectivamente, enquanto que as áreas que não contribuíram para a construção do modelo apresentaram intensidade de exploração estimada e observada de 11,10 e 11,60 m<sup>3</sup>/ha respectivamente.

**Tabela 3.11.** Diferença entre os valores estimados, utilizando dados LiDAR, e observados em campo para intensidade de exploração florestal em parcelas de 25 hectares.

Código da parcela	Intensidade de exploração (m <sup>3</sup> /ha)		Diferença (m <sup>3</sup> /ha)
	Estimada	Observada	
01	32,40	23,18	9,22
02	20,12	18,05	2,07
03	16,97	21,64	-4,68
04	20,30	20,40	-0,10
05	25,74	21,25	4,49
06*	-0,02	8,35	-8,36
07*	12,20	11,20	1,00
08*	0,50	6,04	-5,54
09*	19,59	16,02	3,57
10*	22,43	18,36	4,07
11*	11,90	9,64	2,26
<b>Média</b>	<b>16,56</b>	<b>15,83</b>	<b>4,12</b>
<b>± Desvio Padrão</b>	<b>± 9,89</b>	<b>± 6,01</b>	<b>± 2,83</b>

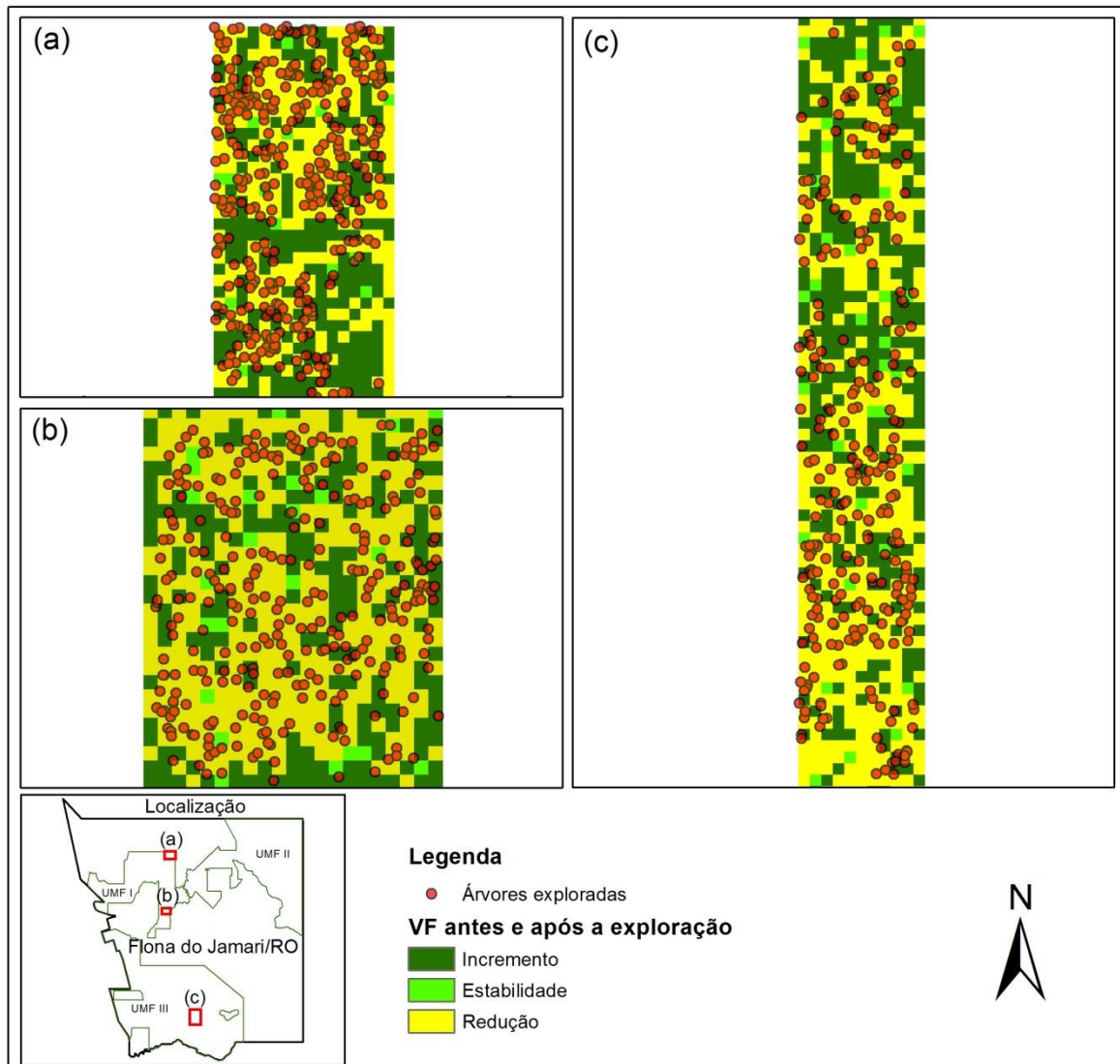
\*Parcelas alocadas em área não utilizada na construção do modelo de volume de fuste.

A média de intensidade de exploração estimada é numericamente superior ao valor observado em campo, em torno de 0,75m<sup>3</sup>/ha, porém estatisticamente, considerando um nível de significância de 0,05, as médias são iguais (t-crítico > t-calculado, p-valor = 0,65). Apesar de pequena, existe um conjunto de razões que podem explicar esta diferença entre elas, o fato do volume explorado registrado no SCC se referir ao volume da tora sem a casca, ou seja, o valor registrado é ligeiramente menor ao valor efetivamente explorado. Outra possível razão é o não registro no SCC de resíduos sem aproveitamento comercial abandonados na floresta, como pedaços de toras ocas. Cabe ressaltar que o desperdício de madeira é coibido pelas equipes de monitoramento do SFB nas áreas de concessão.

Das 1.009 árvores exploradas na área recoberta com os dados LiDAR (Figura 3.12), 81% coincidiram com as células que onde foi estimada redução do volume de fuste, 2% em células que não registraram alteração do volume e 17% em áreas onde estima-se



incremento de volume. Esse resultado indica uma coerência espacial entre os dados e reforça a hipótese de que o deslocamento posicional das árvores deve ser considerado como uma fonte de erro nesta análise.



**Figura 3.12.** Localização das árvores exploradas sobrepostas a métrica da diferença do volume de fuste antes e após a exploração florestal. É possível observar as regiões onde foi verificada redução do volume de fuste (amarelo), onde não foi identificada mudança (verde claro) e os locais onde houve aumento (verde escuro).

Considerando o valor médio de rendimento das árvores exploradas nas áreas de interesse, em torno de  $7,08 \text{ m}^3$ , a diferença entre os valores preditos e observados é da ordem de  $0,58$  árvore/hectare. Uma das razões que pode explicar esta diferença é o reduzido tamanho das parcelas, 25 hectares, associado ao fato da verdade de campo, localização das árvores exploradas, ter sido obtida com auxílio de GNSS de navegação e, portanto estar sujeita a

erros posicionais. Como forma de reduzir esta diferença, o uso de parcelas maiores pode ser uma solução.

De forma geral, a grande vantagem do uso de modelos que não dependem de dados de campo é que, a partir do momento em que uma equação é ajustada e validada para determinado local é possível a obtenção de informações qualitativas e quantitativas em escritório, por meio do processamento da nuvem de pontos do LIDAR aerotransportado, otimizando os trabalhos do monitoramento de planos de manejo florestal. Além disso, mesmo em vistorias de campo, mensurar o volume de madeira retirado em uma área de exploração seletiva não é uma tarefa trivial e também está sujeita a erros.

### **3.5. CONCLUSÕES**

As métricas derivadas de uma nuvem de pontos LiDAR são capazes de predizerem informações como área basal e volume de fuste para áreas de floresta tropical, mesmo quando combinadas com dados de parcela permanente amarradas geograficamente com coordenadas obtidas com equipamento GNSS de navegação. Os resultados indicam que os modelos construídos apresentaram-se precisos e acurados, tanto para área basal, com coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) de 72% e raiz quadrada do erro médio (RMSE) de 2,23 m<sup>2</sup>/ha, quanto para volume de fuste,  $R_{aj}^2$  de 83% e RMSE de 27,7 m<sup>3</sup>/ha.

A combinação dos produtos de volume de fuste, obtidos antes e após a exploração florestal, é capaz de prover informações satisfatórias quanto a intensidade de exploração da área mapeada, a média das diferenças entre os valores preditos e medidos é da ordem de 4,12 m<sup>3</sup>/ha. Como a localização espacial das árvores inventariadas durante processo de licenciamento de um Plano de Manejo não costuma ser realizada com uso de equipamentos GNSS de precisão, recomenda-se o uso de parcelas com área superior a 25 hectares como forma de reduzir as diferenças decorrentes da baixa acurácia espacial das árvores inventariadas.

A modelagem da área basal e do volume de fuste utilizando variáveis derivadas de nuvens de ponto LiDAR tem grande potencial de uso no campo das ciências florestais, além disso, ao se estabelecer uma capacidade de monitoramento da execução de manejos florestais sustentáveis na Amazônia, utilizando dados obtidos através de sensoriamento remoto, mais um passo em direção a identificação e combate da produção ilegal de madeira é dado.

## **4. CAPÍTULO IV: PRINCIPAIS CONCLUSÕES**

### **4.1. REVISITANDO AS QUESTÕES DE PESQUISA**

#### **4.1.1. Quais os danos causados pela extração seletiva de madeiras na estrutura das florestas sob concessão federal?**

Mesmo considerando técnicas de EIR, a exploração florestal implica em um conjunto de operações, compreendendo a derrubada de árvores, o arraste, a construção de estradas, trilhas de arraste e pátio, que reduzem, em primeira instância, a área da cobertura florestal (HENDRINSON, 1989). Dano a floresta remanescente é conceituado pelo Serviço Florestal Brasileiro em seus contratos de concessão florestal (SFB, 2008), como a proporção de área de florestas aberta para a implantação da infraestrutura de exploração, (estradas, trilhas de arraste e pátios) e pela derruba (abertura de clareiras decorrentes da queda das árvores exploradas) em uma Unidade de Produção Anual (UPA).

Baseado nestas considerações o dano a floresta remanescente pode ser dividido entre os danos nos estratos florestais dossel e sub-bosque. Nas áreas de concessão florestal federal, os danos no sub-bosque foram, na média de  $6,8\% \pm 1,4\%$ , e a área de clareiras de  $7,8\% \pm 1,4\%$ . Destaca-se que uma floresta tropical, não perturbada, pode ter de 2% a 4,8% de clareiras naturais, o que demonstra que a abertura de clareiras decorrentes da exploração seletiva de madeira deve ser inferior ao valor de clareiras encontrado.

#### **4.1.2. Como dados LiDAR podem ser utilizados para estimar tais danos? É possível mapear e mensurar estes danos através de classificação automática?**

O uso da métrica LiDAR denominada Modelo de Densidade Relativa (RDM), considerando o extrato de 1 a 5 m de altura em relação ao terreno, explicita o retrato pós-exploratório da área. O padrão de exploração seletiva de madeira, com estradas interligando pátio de estocagem, por sua vez irradiando trilhas de arraste é percebido. Dessa maneira é possível através de interpretação visual da imagem, digitalizar toda infraestrutura de exploração, bem como, a partir de medidas de largura destas infraestruturas obtidas em campo, estimar a área impactada.

O uso da métrica LiDAR denominada Modelo de Altura do Dossel (CHM) apresenta com riqueza de detalhes o dossel florestal, é possível a identificação da altura, da quantidade e

do formato da copa de cada uma das árvores emergentes. Considerando sua alta precisão vertical, é possível extrair desta métrica as áreas de clareiras e dessa maneira estimar a abertura do dossel florestal em uma área explorada. Não é possível, com apenas uma cobertura LiDAR, estimar o dano no dossel decorrente da exploração florestal, para isso é necessário a comparação do CHM antes e após a exploração da área.

É possível obter estimativas de dano a floresta remanescente através da classificação automática da métrica RDM, apesar da disposição espacial dos danos mapeados de maneira automática ser coincidente com o produto obtido de maneira manual, em números absolutos seus resultados não são diretamente comparáveis. Para as áreas avaliadas os valores de área danificada obtidos de maneira automática são 2,3 vezes superiores ao processo manual. Além disso, foi observado que a classificação automática é mais sensível ao tempo decorrido entre o fim da exploração e a aquisição dos dados (sobrevoo) LiDAR do que o método de interpretação visual (manual), por conta da regeneração da área no período. Por outro lado, o método automático se mostrou mais rápido e menos dependente do foto-intérprete e parece detectar alterações mais sutis no sub-bosque e que não foram consideradas no processamento manual.

#### **4.1.3. Qual a relação entre dados LiDAR e as variáveis biofísicas obtidas a partir de levantamentos em campo obtidas em parcelas permanentes?**

Por meio da combinação de variáveis LiDAR com informações extraídas de parcelas permanentes foi possível, utilizando técnica de regressão linear, desenvolver equações capazes de estimar com precisão o volume do fuste ( $R_{aj}^2=0,83$ ,  $RMSE= 27,7 \text{ m}^3/\text{ha}$ ) e a área basal ( $R_{aj}^2=0,72$  e  $RMSE=2,23 \text{ m}^2/\text{ha}$ ) para a Floresta Nacional do Jamari/RO. O melhor modelo para estimativa da área basal encontrado foi “ $AB = 6,4103 + 1,2829 \times Elev.P50 - 1,1205 \times Elev.P95 + 0,7501 \times Elev.P99$ ”. Sendo  $AB$  = área basal em metros quadrados por hectares,  $Elev.P50$  = Percentil 50 da altura em metros,  $Elev.P95$  = Percentil 95 da altura em metros,  $Elev.P99$  = Percentil 99 da altura em metros. O melhor modelo para estimativa de volume de fuste encontrado foi “ $VF = -109,79 + 25,79 \times Elev.mean - 17,884 \times Elev.P95 + 11,826 \times Elev.P99$ ”. Sendo  $VF$  = volume do fuste em metros cúbicos por hectares,  $Elev.mean$  = Altura média em metros,  $Elev.P95$  = Percentil 95 da altura em metros,  $Elev.P99$  = Percentil 99 da altura em metros.

A combinação dos produtos de volume de fuste, obtidos antes e após a exploração florestal, é capaz de prover informações satisfatórias quanto a intensidade de exploração da área objeto de manejo, a média das diferenças entre os valores estimados e observados foi de 4,12 m<sup>3</sup>/ha, o que representa em termos percentuais uma diferença de 32,9%.

#### **4.2. CONTEXTO DESTA PESQUISA NO MONITORAMENTO DA EXPLORAÇÃO DE MADEIRA NA AMAZÔNIA**

Este estudo contribuiu no entendimento do uso de dados LiDAR para o monitoramento da exploração seletiva de madeira realizada na região amazônica. Os resultados de dano a floresta remanescente encontrados contribuem para a discussão da qualidade e eficiência da execução das operações florestais em áreas de concessão federal. Extrapolar o uso desta tecnologia para as demais áreas de Plano de Manejo Florestais Sustentáveis, como áreas privadas e comunitárias tem o potencial de reduzir o impacto ambiental deste tipo de operação bem como a ilegalidade do setor.

A modelagem da área basal e do volume de fuste utilizando variáveis derivadas de nuvens de ponto LiDAR tem grande potencial de uso no campo das ciências florestais, além disso, ao se estabelecer uma capacidade de monitoramento da execução de manejos florestais sustentáveis na Amazônia, utilizando dados obtidos através de sensoriamento remoto, um grande passo em direção a identificação e combate da produção ilegal de madeira é dado.

Outra importante aplicação dos modelos de volume de fuste derivados de variáveis LiDAR diz respeito a quantificação do potencial madeireiro das florestas destinadas a concessão florestal. As estimativas geradas por esses modelos podem servir como referência para a construção de editais de licitação, permitindo uma melhor distribuição dos recursos madeireiros entre as Unidades de Manejo Florestal além de servir como importante subsídio para que os interessados possam fazer uma modelagem econômica e uma oferta mais realista para suas áreas de interesse.

#### **4.3. PRINCIPAIS CONCLUSÕES**

A detecção e mensuração de danos no sub-bosque e dossel florestal resultantes da exploração seletiva de madeiras podem ser feitas com boa acurácia utilizando dados

LiDAR. Os resultados são similares aos resultados obtidos a partir de levantamentos em campo com equipamento GNSS de navegação.

A exploração florestal feita em áreas de concessão florestal federal na área e período do presente estudo, no que diz respeito ao dano a floresta remanescente, pode ser considerada como de impacto reduzido.

Os impactos causados à floresta e a intensidade de exploração estão diretamente relacionados, indicando que os baixos valores encontrados de dano ao sub-bosque são, em parte, explicados pela baixa intensidade média de exploração.

Mensurar o dano a floresta remanescente, utilizando dados LiDAR, contribui para o monitoramento da atividade madeireira na Amazônia brasileira, pois permite não apenas identificar com precisão as áreas manejadas, mas também qualificar, de maneira objetiva, a execução de um Plano de Manejo Florestal.

As métricas derivadas de uma nuvem de pontos LiDAR são capazes de predizerem informações como área basal e volume de fuste para áreas de floresta tropical, mesmo quando combinadas com dados de parcela permanente amarradas geograficamente com coordenadas obtidas com equipamento GNSS de navegação.

#### **4.4. OPORTUNIDADE PARA ESTUDOS FUTUROS**

Novos estudos, que contemplem o teste de diferentes métricas LiDAR e diferentes resoluções espaciais, para o mapeamento de danos decorrente da exploração seletiva de madeira podem ser conduzidos no sentido de melhorar os resultados aqui encontrados. O uso de equipamentos GNSS de alta precisão, para servir como verdade de campo também enriqueceria essa discussão.

Sugere-se a condução de estudos que possam qualificar o dano a floresta remanescente nos seus diferentes componentes, de acordo com Pinagé et al. (2015) e Locks & Amaral (2015), após dois anos da exploração, as trilhas de arraste, que representam 70% do dano no sub-bosque, tornam-se imperceptíveis em análises de dados LiDAR, o que demonstra uma alta capacidade de recuperação da floresta perturbada por este tipo de infraestrutura. O mesmo não foi percebido para estradas e pátios, consideradas infraestrutura permanente.

Atribuir pesos distintos aos diferentes danos pode ser mais assertivo no monitoramento da qualidade da execução de um Plano de Manejo Florestal Sustentável.

A capacidade de modelar, a partir de dados LiDAR, a área basal e o volume de fuste de uma floresta, tem implicação não apenas no controle da produção de uma floresta, permitindo a estimativa da intensidade de exploração madeireira da mesma, mas também abre a possibilidade da condução de estudos que objetivem acompanhar sua recuperação, através do incremento do volume de fuste e da área basal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, C.; MOESLUND, J. E.; BØCHER, P. K.; ARGE, L.; SVENNING, J. Airborne laser scanner (LiDAR) proxies for understory light conditions. **Remote Sensing of Environment**, v. 134, p. 152-161, 2013.
- ANDERSEN, H. E.; MCGAUGHEY, R. J.; REUTEBUCH, S. E. Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 441-449, 2005.
- ANDERSEN, H. E.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; KELLER, M. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat LiDAR flights. **Remote Sensing of Environment**, New York, 2013.
- ASNER, G. P.; KELLER, M.; SILVA, J. N. M. Spatial and temporal dynamics of forest canopy gaps following selective logging in the eastern Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, p. 765-783, 2004.
- ASNER, G. P.; KNAPP, D. E.; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, P. J. C.; KELLER, M. SILVA, J. N. Selective logging in the Brazilian Amazon. **Science**, n. 310, p. 480-482, 2005.
- ASNER, G. P.; MASCARO, J. Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. **Remote Sensing of Environment**, n. 140, p. 614-624, 2014.
- ASNER, G. P.; MASCARO, J.; MULLER-LANDAU, H.; VIEILLEDENT, G.; VAUDRY, R.; RASAMOELINA, M.; HALL, J. S.; BREUGEL, M. V. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. **Oecologia**, v.168, n. 4, p. 1147-1160, 2011.
- BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 83-94, 1999.
- BOLKER, B. **Ecological Models and Data in R**. Princeton and Oxford. Princeton University Press. 516 p., 2007.



- BOMFIM, S. L.; SOUZA, A. N.; RODRIGUEZ, L. C. E.; JOAQUIM, M. S.; MARTINS, I. S. Índice de clima econômico para concessões florestais. **Scientia Florestalis**. v. 44, n. 10, p. 331-342, 2016.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W.G. **Statistics for experimenters: design, discovery, and innovation**. 2<sup>nd</sup> Edition. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. 655 p., 2005.
- BRASIL. Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 3 mar. 2006. Seção 1, p. 1.
- CARVALHO, S. P. C.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SILVA, L. D.; CARVALHO, L. M. T.; CALEGARIO, N.; LIMA, M. P.; SILVA, C. A.; MENDONÇA, A. R.; NICOLETTI, M. F. Predict volume of trees integrating LiDAR and Geostatistics. **Scientia Florestalis**, v. 43, n. 107, p. 627-637, 2015.
- COOPS, N. C.; HILKER, T.; WULDER, M. STONGE, B.; NEWNHAM, G.; SIGGINS, A.; TROFYMOW, J. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LIDAR. **Trees**, v. 21, n. 3, p. 295-310, 2007.
- COSTA, H. B.; CARVALHO, J. O. P.; LOPES, J. C. A. Áreas abertas pela exploração. In: Relatório técnico anual do centro de pesquisa agropecuária de trópico úmido. Belém, EMBRAPA/CPATU, p 304, 1984.
- DANDOIS, J. P.; ELLI, E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 259-276, 2013.
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H. E. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 124, p. 479-491, 2012.
- DUBAYAH, R.; KNOX, R.; HOFTON, M.; BLAIR, J. B.; DRAKE, J. Land surface characterization using LiDAR remote sensing. **Gordon & Breach Science Publishers**, p. 25-38, Amsterdam, 2000.

- ELLI, P.; GRISCOM, B.; WALKER, W.; GONÇALVES, F.; CORMIER, T. Mapping selective logging impacts in Borneo with GPS and airborne LiDAR. **Forest Ecology and Management**, v. 365, p. 184-196, 2016.
- EMMERT, F. Combinação de dados de campo e métodos computacionais para o planejamento de exploração florestal na Amazônia. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. 190p. 2014.
- ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10.1. Redlands, CA: ESRI, 2012.
- FIGEIREDO, E. O.; d'OLIVEIRA, M. V. N.; FEARNSSIDE, P. M.; PAPA, D. A. Modelos para estimativa de volume de árvores individuais pela morfometria da copa obtida com LiDAR. **CERNE**, v. 20, n. 4, p. 621-628, 2014.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Global Forest Resources Assessment 2015: How are the world's forests changing?** Food and Agriculture Organization, Rome, 2015.
- GARRASTAZU, M. C.; ROSOT, M. A. D.; OLIVEIRA, Y. M. M.; COSTA, F. A.; GONÇALVES, F. M. **Manual de Orientação e uso do GPS de Navegação: Garmin 76MAP CSX**. Embrapa Florestas, Colombo/PR, 55p. 2011.
- GIANNICO, V.; LAFORTEZZA R.; JOHN, R.; SANESI, G.; PESOLA, L.; CHEN, J. Estimating Stand Volume and Above-Ground Biomass of Urban Forests Using LiDAR. **Remote Sensing**, v.8, n. 339, 14p., 2016.
- GIBBS, H. K.; BROWN, S.; NILES, J. O.; FOLEY, J. A. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. **Environmental Research Letters** 2. 045023. 13p. 2007
- GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. D. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010.
- GONÇALVES, G.; SECO, L. G. Utilização de dados LiDAR na classificação de objectos situados em zonas rurais. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA, 5., 2007, Coimbra. **Actas...** Coimbra: Editora Lidel, 2007. P. 167-176. 2007.

- GOODCHILD, M.F.; HUNTER, G.J. A simple positional accuracy measure for linear features. **International Journal of Geography Information Science**. v.11, p. 299–306. 1997.
- GREENPEACE. A Crise silenciosa da Amazônia: Parceiros do Crime. Relatório de 2 nov. 2015. Disponível em: [http://chegademadeirailegal.org.br/doc/BR/crise\\_silenciosa\\_amazonia\\_parceiros\\_no\\_crime.pdf](http://chegademadeirailegal.org.br/doc/BR/crise_silenciosa_amazonia_parceiros_no_crime.pdf). Acesso em 17 jun. 2016.
- HENDRINSON, J. **Damage – Controlled logging in managed tropical rain forests in Suriname**. Wargeningen, Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 204p. 1989.
- HIGUCHI, F. G. **Dinâmica de volume e biomassa da floresta de terra firme do Amazonas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 207p. 2015.
- HIRATA, Y.; FURUYA, N.; SUZUKI, M.; YAMAMOTO, H. Airborne laser scanning in forest management: individual tree identification and laser pulse penetration in a stand with different levels of thinning. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 5, p. 752-760, 2009.
- HOARE, A. Tackling Illegal Logging and the Related Trade: What Progress and Where Next? **Chatham House Report**. The Royal Institute of International Affairs. London, 63p. 2015.
- HUNTER, M. O.; KELLER, M.; VICTORIA, D.; MORTON, D. C. Tree height and tropical forest biomass estimation. **Biogeosciences**, v.10, p. 8385–8399, 2013.
- HUNTER, M. O.; KELLER, M.; MORTON, D. C.; COOK, B.; LEFSKY, M.; DUCEY, M.; SALESKA, S.; OLIVEIRA JR., R. C.; SCHIETTI, J. Structural Dynamics of Tropical Moist Forest Gaps. **PLOS One**, v. 10, 19p. 2015
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 271 p., 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura.

Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pevs/default.asp>. Acesso em: 17 jun. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, **Norma de Execução Nº 1, de 24 de abril de 2007 - Diretrizes Técnicas para Elaboração dos Planos de Manejo Florestal Sustentável – PMFS**. Diário Oficial da União – Seção 1 – 30/04/2007, Página 405.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Mapeamento Da Degradação Florestal Na Amazônia Brasileira – DEGRAD**. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/degrad/>. Acesso em 20 mai. 2016.

INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA – IMAZON. **Sistema de Alerta de Desmatamento - SAD**. Disponível em: <http://www.imazon.org.br/publicacoes/transparencia-florestal>. Acesso em 20 mai. 2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução da 2ª ed. EPIPHANIO, J. C. N. (org.). São José dos Campos: Parêntese Editora, 672 p., 2009.

JENSEN, J. R.; HUMES, K.; VIERLING, L.; HUDAK, A. Discrete return LiDAR-based prediction of leaf area index in two conifer forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3947-3957, 2008.

JOHNS, J. S.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, n. 89, p. 59-77. 1996.

LEITOLD, V.; KELLER, M.; MORTON, D. C.; COOK, B. D.; SHIMABUKURO, Y. Airborne lidar-based estimates of tropical forest structure in complex terrain: opportunities and trade-offs for REDD+. **Carbon Balance and Management**. v.10, 12p. 2015.

LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; HARDING, D. J.; PARKER, G. G.; ACKER, S. A.; GOWER, S. T. LiDAR remote sensing of above-ground biomass in three biomes. **Global Ecology and Biogeography**, Edinburgh, v. 11, p. 393-399, Sept. 2002.

- LENTINI, M. W.; ZEWEED, J. C.; HOLMES, T. P. **Measuring Ecological Impacts from Logging in Natural Forests of the Eastern Amazônia as a Tool to Assess Forest Degradation.** Forest Resources Assessment Working Paper 165, Rome, Italy, 2009.
- LOCKS, C. J.; AMARAL, L. G. C. Análise multitemporal de dados LiDAR para avaliação da recuperação no sub-bosque florestal em concessões florestais. In. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XVII, 2015, João Pessoa-PB. **Anais...** p. 1494-1501. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0277.pdf>. Acesso em 17 jun. 2016.
- LUMLEY, T. Leaps: Regression Subset Selection (Using Fortran Code by Alan Miller). <http://CRAN.R-project.org/package=leaps>. 2009.
- MATRICARDI, E. A. T. **Spatiotemporal dynamics of forest degradation by selective logging and forest Fire in the Brazilian amazon.** Dissertation. Michigan State University. 269 p., 2007.
- MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; PEDLOWSKI, M. A.; CHOMENTOWSKI, W.; FERNANDES, L. C. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p.1117–1129, 2010.
- MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; PEDLOWSKI, M. A.; CHOMENTOWSKI, W. 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.
- MCGAUGHEY, R. J. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 2010.
- MERRY, F.; SOARES FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; AMACHER, G.; RODRIGUES, H. Balancing Conservation and Economic Sustainability: The Future of the Amazon Timber Industry. **Environmental Management**. Springer Science+Business Media, LLC. 13 p. 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, **Instrução Normativa N° 5, de 11 de dezembro de 2006 – Procedimentos Técnicos para elaboração, apresentação, execução e análise de Planos de Manejo Florestal Sustentável – PMFS**. Diário Oficial da União – Seção 1 – 13/12/2006, Página 155.

MURA, M.; McROBERTS, R. E.; CHIRICI, G.; MARCHETTI, M. Estimating and mapping forest structural diversity using airborne laser scanning data. **Remote Sensing of Environment**. v. 170, p. 133-142, 2015.

NÆSSET, E. Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest ecosystems. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Freiburg, v. 36, p. 145-148, 2004.

NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, v.96, p. 453–465, 2005.

NELSON, R., KRABILL, W. AND MACLEAN, G. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, v. 15, p. 201–212, 1984.

NEPSTAD, D. C.; VERISSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, n. 398: p. 505–508. 1999.

NGUYEN, L. V.; TATEISHI, R.; KONDOH, A.; SHARMA, R. C.; NGUYEN, H. T.; TO, T. T.; MINH, D. H. T. Mapping tropical forest biomass by combining ALOS-2, Landsat 8, and field plots data. **Land**. v.5, n.31, 15p. 2016.

NOGUEIRA, E. M.; FEARNSIDE, P. M.; NELSON, B. W.; BARBOSA, R. I.; KEIZER, E. W. H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**. n. 256, p. 1853-1867, 2008.

OLIVEIRA, L. T.; FERREIRA, M. Z.; CARVALHO, L. M. T.; FILHO, A. C. F.; OLIVEIRA, T. C. A.; SILVEIRA, E. M. O.; JUNIOR, F. W. A. Determinação do

- volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, n.9, p.692-699, set. 2014.
- PEREIRA, R.; ZWEEDE, J.; ASNER, G.; KELLER, M. Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para, Brazil. **Forest Ecology and Management**, n. 168, p. 77-89, 2002.
- PINAGÉ, E. R.; LOCKS, C. J. Aplicação de dados LiDAR na avaliação de alterações no sub-bosque florestal em concessões florestais. In. Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal, 11, 2014, Curitiba. **Anais...** p. 122-129. Disponível em: <http://www.11sengef.com.br/arquivos/documentos/anaisonline/SENGEF2014.pdf>. Acesso em 23 out. 2014.
- PINAGÉ, E. R.; MATRICARDI, E. A. T. Detecção da Infraestrutura para Exploração Florestal em Rondônia Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto. **Floresta e Ambiente**, v. 22(3), p. 377-390, 2015.
- PINAGE, E. R.; KELLER, M.; SANTOS, M. N.; SPINELLI-ARAUJO, L.; LONGO, M. Avaliação temporal dos efeitos da exploração madeireira usando dados LiDAR. In. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XVII, 2015, João Pessoa-PB. **Anais...** p. 834-841. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0158.pdf>. Acesso em 17 jun. 2016.
- PUTZ, F. E.; ZUIDEMA, P. A.; SYNNOTT, T.; PENA-CLAROS, M.; PINARD, M. A.; SHEIL, D.; VANCLAY, J. K.; SIST, P.; GOURLET-FLEURY, S.; GRISCOM, B.; PALMER, J.; ZAGT, R. Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: the attained and the attainable. **Conservation Letters**, v.5, p. 296–303, 2012.
- R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 2012.
- READ, J.M. Spatial analyses of logging impacts in Amazonia using remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 69, p. 275–282, 2003.
- ROBERTS, S. D.; DEAN, T. J.; EVANS, D. L.; MCCOMBS, J. W.; HARRINGTON, R. L.; GLASS, P. A. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using

- LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions. **Forest Ecology and Management**, v. 213, p, 54-70, 2005.
- SCHREUDER, H. T.; BANYARD, S. G.; BRINK, G. E. Comparison of three sampling methods in estimating stand parameters for a tropical forest. **Forest Ecol. Manag.**, n. 21, p. 119–127, 1987.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Fichas de parametrização de indicadores para fins de classificação e bonificação no lote de concessão florestal**. EDITAL N° 01/2007 - Anexo 12, 26p., 2008.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Guia para Medição de Produtos e Subprodutos Florestais Madeireiros das Concessões Florestais**. Brasília, 48 p., 2012.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Sistema de Cadeia de Custódia**. <http://sistemas.florestal.gov.br/cadeiacustodia/>, último acesso em 30/09/2014.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Cadastro Nacional de Florestas Públicas CNFP-2015. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/informacoes-florestais/cadastro-nacional-de-florestas-publicas/cadastro-nacional-de-florestas-publicas>. Acesso em 17 jun. 2016.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Gestão de Florestas Públicas - Relatório 2015. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/noticias-do-sfb/relatorio-apresenta-conquistas-na-gestao-das-florestas-publicas>. Brasília: MMA/SFB. 75p. 2016.
- SOUZA, C. M.; SIQUEIRA, J. V.; SALES, M. H.; FONSECA, A. V.; RIBEIRO, J. G.; NUMATA, I.; COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P.; ROBERTS, D. A.; BARLOW, J. Ten-Year Landsat Classification of Deforestation and Forest Degradation in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing**, n. 5, p. 5493-5513, 2013.
- SOUZA, C. M.; ROBERTS, D. A.; COCHRANE, M. A. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. **Remote Sensing of Environment**, v.98, p. 329–343, 2005.
- UHL, C.; VIEIRA, I.C.G. Extração seletiva de madeiras: impactos ecológicos em Paragominas. **Pará Desenvolvimento**, IDESP, (23): 46-52, 1988.



- UHL, C.; BARRETO, P.; VERÍSSIMO, A.; VIDAL, E.; AMARAL, P.; BARROS, A. C.; SOUZA, C. JR.; JOHNS, J.; GERWING, J. Natural Resource Management in the Brazilian Amazon. **BioScience**, v.47, n.3, p. 160-168, 1997.
- UNITED STATES FOREST SERVICE – USFS. **First Order Lidar Metrics: A supporting document for LiDAR deliverables**. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 2014.
- VALENTE, M. D. R.; QUEIROZ, V. T.; PINHEIRO, J. G.; MONTEIRO, L. A. S. Modelo de predição para o volume total de Quaruba (*Vochysia inundata* Ducke) via análise de fatores e regressão. **Revista Árvore**, v.35, n.2, p. 307-317, 2011.
- VERÍSSIMO, A.; MATTOS, M.M.; BRANDINO, Z.; UHL, C.; VIEIRA, I.C.G. Impactos sociais, econômicos ecológicos da exploração seletiva de madeira numa região de fronteira na Amazônia Oriental: O caso de Tailândia. **Pará Desenvolvimento**, v.25, p. 95-116, 1989.
- VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; TARIFA, R.; UHL, C. Extraction of a high-value natural resource in Amazonia: the case of mahogany. **Forest Ecology and Management**, v.72, p. 39-60, 1995.
- WAGNER, W.; ULLRICH, A.; MELZER, T.; BRIESE, C.; KRAUS, K. From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Geo-Imagery Bridging Continents: proceedings...**Istanbul, p. 201-206, 2004.
- YAO, W.; KRZYSZEK, P.; HEURICH, M. Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v.123, p. 368-380, 2012.
- ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ, L. C. E.; PACKALÉN, P. Estimación de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225-235, 2010.