

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Impacto do manejo de precisão em florestas tropicais

Daniel de Almeida Papa

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2018**

Daniel de Almeida Papa
Engenheiro Florestal

Impacto do manejo de precisão em florestas tropicais
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Papa, Daniel de Almeida

Impacto do manejo de precisão em florestas tropicais / Daniel de Almeida
Papa. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011.
- - Piracicaba, 2018.

112 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz
de Queiroz”.

1. Manejo florestal de precisão 2. Lidar 3. Inventário florestal 4. Amazônia
I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao **Jovem** pesquisador da área de manejo e conservação do Cerrado, nosso querido amigo **Artur Orelli Paiva** (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A todos os colaboradores da Embrapa que viabilizaram a oportunidade de me aperfeiçoar profissionalmente pelo programa de pós-graduação da empresa, em especial ao chefe da Unidade no Acre, o pesquisador Dr. Eufran Amaral; aos pesquisadores Evandro Orfanó Figueiredo, Marcus Vinício Neves d'Oliveira e Evaldo Muños Bras pelo pioneirismo e inovações criadas no setor de manejo de florestas tropicais; aos colegas do setor de transferência de tecnologia, em particular aos colegas Patrícia Drumond, Gilberto Nascimento, Dorila Gonzaga, Bruno Pena, Gabi Moncada, Roberto Peres e Fernando Malavazi que se desdobraram para apoiar minha ausência; aos colegas Beth, Jana, Mauro, Rê e Renata, do setor de gestão de pessoas, que me deram todo suporte necessário; aos técnicos Airton, Paulo, Freire e Aldeci pelo trabalho e conhecimento de campo fundamentais nessa pesquisa; aos chefes Jackson e João Batista pelo suporte administrativo e a todos os demais colegas dos diversos setores da empresa que foram fundamentais para que esse mestrado acontecesse. Grato família Embrapa Acre!

Aos professores(as) da ESALQ/USP, em especial ao prof. orientador Luiz Carlos Estraviz Rodriguez pela oportunidade de vivenciar essa experiência; ao prof. Edson Vidal pelo trabalho exemplar de disseminação e estudo do manejo florestal na Amazônia, bem como aos professores Pedro Brancalion e Carlos Tadeu dos Santos pelas críticas construtivas ao trabalho; aos professores Demóstenes Ferreira e Eric Gorgens (UFVJM) pelas valiosas sugestões durante a etapa de qualificação; aos pesquisadores Carlos Silva e Marcos Longo pela troca de conhecimento e disponibilidade em contribuir com esse estudo; ao pesquisador, cantor, irmão e camarada Danilo R. A. de Almeida, pela sua genialidade indomável que me inspirou a seguir por um caminho próprio nessa jornada; a queridíssima Giovana, técnica do programa de pós-graduação em Recursos Florestais da ESALQ/USP pelo carinho e atenção dispendidos aos estudantes do programa; ao técnico Jeff pela disposição exemplar e qualificada de ajudar a todos; aos colegas do laboratório de métodos quantitativos e de outros grupos de pesquisa, em especial ao Lucas, Gabriel, Renata, Anderson, Cris, Thais, Tiago, Clayton, Silvio, Kálita, Rafa, Ju, Luísa, Samantha, Caio, Samara, Luciana, Tito, Dea, Débora e Mauren. Foi essencial conviver, estudar e aprender com vocês durante esses anos.

Sou muito grato também aos professores e colegas de outros cursos, em especial, do curso de Estatística Experimental da ESALQ, por terem me acolhido, me estimulado a superar meus limites e pelo desafio de aplicar o conhecimento teórico nessa dissertação.

Gratidão eterna a Su, pelos ensinamentos fundamentais da matemática e experiências engrandecedoras vividas no relacionamento – cada segundo ao seu lado fez de mim uma pessoa melhor. Muito obrigado por aceitarem fazer parte da minha vida Su, Dona Arlete e *Cauchy Newton*! Faria tudo novamente...

Aos moradores da república de pós-graduação: Tomás *Bebedouro*, Danilo *Pulga*, Diego *Gadim*, Fabrício *Jussa*, Bruno *Koga* e a nossa mascote *Paçoquinha*. Foram momentos de alegria, tristeza e muito aprendizado. Foi uma honra conviver ao lado de vocês.

A rapazeada da República Strunzo (Terçado, Filhão, Favorável, Aborto, Salvo, Faiado, DD2, Cilada e Pulga) pela sagacidade individual de cada um e pelo espírito coletivo multitemporal que mantém a república ao longo de quatro décadas!

Aos artistas que dividiram seu talento e espontaneidade com a banda Forró dos Mestres nos encontros da pós-graduação, em especial ao Fred e Netão!

Aos profissionais da área florestal que me deram sugestões e muita inspiração durante o mestrado: Junia Karst (Imaflora), Renato Mesquita, Victor Melo e Chris Araújo (IMAC), Elias Alves (SIGMA), Martin Isenburg (rapidlasso), Andrew Hudak (USDA), César F. de Paula (FotoTerra), David Escaquete (SR4), Robson (RRX), Robson (Estação Florestal), Tasso Azevedo (MapBiomias), Charton e Zé Humberto (SFB), Eben Broadbent e Luiza Violato (Univesidade da Flórida), Peterson Fiorio e Maurício Martelo (TopGeo), Lova e Carol (ICMBio), Marcos Muda e Fernanda Fonseca (Embrapa), Rone Parente (IDSM), Pedro Salles (IBAMA), e Alba Rezende e Ricardo Haidar (UnB) – um tanto de todos vocês está aqui na dissertação.

Agradecimentos especiais para as pessoas que cuidaram de mim durante os momentos de stress da pós-graduação: o *coaching* Fabiano Santana pela reorientação profissional; ao Rodrigo Murakami, pelos treinos personalizados; à fisioterapeuta Sofia (Haus Pilates) pelas mãos mágicas que realinharam meu corpo; e ao acumpunturista Eitor Yoshi, que me deu sobrevida nos momentos mais tensos do mestrado. O profissionalismo de vocês, literalmente, me manteve em pé nessa jornada.

Sou muito grato também aos moradores da Rua dos Lírios, em especial a Cris, Sebastião, Bruno e Bia - minha família em Rio Branco-AC. Sem vocês nada disso teria sido possível. Muito obrigado pelo carinho e apoio de todos os amig@s do Acre que me incentivaram a fazer o mestrado.

Por fim, gratidão à Deus que se faz presente em meus familiares Marcos (pai), Rúbia (mãe), Uri (irmão), Rá (irmã), Cecel (irmão), Dudu (sobrinho), Felipe (sobrinho), Rafael (sobrinho) e a Luiza (filha) pelo amor e apoio incondicionais oferecidos por vocês, diariamente, ao longo desses anos.

Para quem acha que é possível fazer o mestrado sozinho, lamento dizer, você não sabe o que está deixando de aprender.

EPÍGRAFE

Terra Plana

*Era uma vez um mundo bidimensional que possuía largura e comprimento; ali não existia altura. Todos em **Terra Plana** moviam-se livremente, como as sombras se movem sobre a Terra, totalmente inconscientes da dimensão da altura.*

O personagem principal da Terra Plana era o Quadrado, que certa noite teve um sonho, no qual se viu transportado para a **Terra Linear**. Na Terra Linear, todas as coisas eram ou pontos, ou séries de pontos, organizados em linhas retas. Todos se locomoviam livremente nesta dimensão, mas não tinham qualquer ideia da existência da largura e da altura. Nesta Terra Linear, nosso herói Quadrado tentou de todas as maneiras explicar aos seus habitantes, sem sucesso, as características da dimensão que faltava. Frustrado, foi até a Linha mais longa desse local e disse: "*Aqui, na Terra Linear, você é a linha das linhas, ou a Rainha das Linhas, mas na minha terra, a Terra Plana, você não seria nada. Comparada a mim, você não é nada, enquanto eu, comparado com os nobres da minha terra, sou apenas um quadrado*".

Todas as linhas ficaram magoadas e zangadas com o que o Quadrado disse, e se alinharam, prontas para atacá-lo, quando este, de repente, despertou de seu sono, trêmulo, mas feliz ao perceber que tudo não passara de um sonho.

Mais tarde, naquele mesmo dia, o velho Quadrado explicava a seu neto, o Hexágono, algumas noções de geometria. *(na Terra Plana, cada geração seguinte, possuía um lado a mais que seus respectivos pais, até atingir tantos lados que se tornavam indistintos do círculo, a ordem sacerdotal. Mas, é claro, havia uma exceção, os inferiores triângulos, que sempre serão triângulos).*

À medida que o Quadrado procurava explicar ao neto como achar a área de um quadrado, por meio do quadrado da medida de um dos seus lados, o neto perguntou-lhe o que poderia acontecer na geometria se alguém elevasse ao cubo esta mesma medida. O Quadrado explicou, pacientemente, que não existia tal coisa de "elevado ao cubo" na geometria. O neto, confuso, continuou insistindo, até que o Quadrado, zangado, mandou-o para a cama, advertindo-o de que se ele fosse mais sensato e falasse menos besteiras se sairia melhor em geometria. Naquela noite, sentado e lendo o jornal, o Quadrado continuou resmungando para si mesmo: "*Não existe este negócio de elevado ao cubo na geometria...*".

De repente, ele ouviu uma voz às suas costas, dizendo: “*Sim, existe!*” Olhou assustado para os lados e viu uma Esfera brilhante na sala. A Esfera era uma visitante da **Terra Espacial**, um mundo em que havia três dimensões, como nós conhecemos aqui na Terra. E a Esfera tentou sem êxito explicar ao Quadrado o que era a Terra Espacial, quando resolveu criar para o Quadrado algo que chamamos aqui de experiência transcendental; isto é, ela o transportou para a Terra Espacial. O Quadrado abriu os olhos, olhou ao redor e disse: “Isso é uma loucura... ou então é o próprio inferno!” E a Esfera respondeu: “Não, não é nenhum dos dois... isto é Conhecimento... abra os olhos e olhe ao seu redor”. Assim o Quadrado fez, e excitado com tudo o que via começou a falar e questionar a Esfera sobre a possibilidade da existência de mundos com quatro ou até cinco dimensões. A Esfera respondeu, zangada: “*Não existe tal absurdo!*” e, aborrecida, mandou-o rapidamente de volta à Terra Plana.

O Quadrado, desde então, rodou pela Terra Plana, pregando a visão mística de um mundo de três dimensões. Desacreditado, foi confinado numa instituição mental, onde, uma vez por ano, era visitado por um Círculo da classe dos sacerdotes, que o entrevistava e avaliava como ele estava indo.

E todas as vezes que ele insistia em tentar explicar ao Círculo a dimensão da Terra Espacial, este, desanimado, balançava a cabeça e deixava o Quadrado trancafiado por mais um ano.

Terra Plana: Um Romance de Muitas Dimensões
Autor: Edwin A. About, 1884

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. ORGANIZAÇÃO DO CONTEÚDO	20
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO / HIPÓTESE	21
REFERÊNCIAS	22
2. PRINCÍPIOS DO MANEJO FLORESTAL DE PRECISÃO PARA EXPLORAÇÃO MADEIREIRA NA AMAZÔNIA	26
RESUMO	26
ABSTRACT	26
2.1. OBJETIVO	27
2.2. HISTÓRIA DO MANEJO FLORESTAL NA AMAZÔNIA	27
2.3. ETAPAS DO PLANO DE MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL (PMFS)	36
2.4. LEVANTAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO	41
2.5. UNIDADE DEMONSTRATIVA DE MANEJO FLORESTAL DE PRECISÃO	54
2.6. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	68
3. COMO REDUZIR A INTENSIDADE AMOSTRAL DO INVENTÁRIO EM FLORESTAS TROPICAIS A PARTIR DO LIDAR?	81
RESUMO	81
ABSTRACT	82
3.1. INTRODUÇÃO.....	83
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	86
3.3. RESULTADOS	91
3.4. DISCUSSÃO.....	96
3.5. CONCLUSÃO	99
3.6. MATERIAL SUPLEMENTAR	100
REFERÊNCIAS	103
4. CONCLUSÃO GERAL	111

RESUMO

Impacto do manejo de precisão em florestas tropicais

O manejo florestal madeireiro é uma atividade que promove a manutenção da cobertura florestal em áreas de floresta primária no Brasil. Atualmente, as técnicas de manejo estão sendo aperfeiçoadas pelo desenvolvimento de novas tecnologias da área de geoprocessamento, como o Sistema Global de Posicionamento por Satélite (GNSS), Lidar (Light detection and ranging) aerotransportado (ALS) e Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs). O objetivo geral deste trabalho é apresentar os princípios do manejo florestal de precisão aplicados para a região amazônica e avaliar a capacidade dos dados do Lidar na redução da intensidade amostral no inventário florestal. Para tal, foi utilizada uma área demonstrativa de manejo florestal de precisão localizada no campo experimental da Embrapa, no município de Rio Branco, Acre. O estudo foi desenvolvido em uma área contínua de 800 hectares, com presença de floresta primária do tipo umbrófila, aberta, com presença de palmeiras, bambu e manchas de floresta alta. Foram realizadas duas coletas de dados nesta área: o censo florestal das árvores com DAP ≥ 40 cm, com o qual calculou-se a área seccional de cada árvore; e o voo Lidar feito a uma altitude de 600 metros, com *footprint* de 30 cm e densidade de 14 pts.m². A partir dos dados Lidar foram extraídas os modelos digitais de superfície (MDS), do terreno (MDT) e altura (MAD), e as métricas Alt_{md} (altura média do dossel), rugosidade (desvio padrão da altura média do dossel), Alt_{dossel} (abertura do dossel a 15 metros), LAI (índice de área foliar) e LAI_{sub} (LAI do sub-bosque – faixa entre 5 a 12 metros de altura). No capítulo 01, os dados foram analisados de forma a demonstrar a aplicação do Lidar no aperfeiçoamento das atividades técnicas do manejo florestal na amazônia, sendo elas: (i) macroplanejamento da Área de Manejo Florestal (AMF); (ii) microplanejamento do terreno e hidrografia da Unidade de Produção Anual (UPA); (iii) censo e amostragem florestal; (iv) planejamento da infraestrutura de exploração; e (v) monitoramento. Na análise dos dados do capítulo 02, foram feitas: (i) estimativa dos atributos estruturais derivados do inventário de campo e da nuvem de retornos Lidar para três tamanhos de célula; (ii) correlação de Pearson entre os atributos do campo e do dossel derivados do Lidar; (iii) análise de agrupamento para formação dos estratos pelo método de Ward; (iv) validação (ANOVA) e caracterização dos estratos (PCA); e (v) estimativa de redução da intensidade amostral por meio de uma simulação computacional. Como resultado, os mapas gerados mostram a acurácia e qualidade dos dados do Lidar para o mapeamento de unidades de produção anual dentro da área de manejo florestal, microzoneamento da topografia, modelagem da rede de drenagem, identificação de áreas de relevo acidentado, delimitação da APP e planejamento da infraestrutura de exploração respeitando as condições ambientais e potencial madeireiro da área de estudo. A altura média do dossel da floresta (Alt_{md}), obtida com o Lidar, apresentou a maior correlação ($r = 0,74$) com a área basal e foi utilizada para estratificar a vegetação em quatro padrões de floresta, com diferença significativa entre eles para a variável de campo. A estratificação com a Alt_{md} distinguiu bem a floresta quanto ao seu gradiente de variação estrutural e perfil de densidade da vegetação. A simulação do inventário estratificado *versus* o inventário inteiramente casualizado evidenciou a capacidade da variável Lidar Alt_{md} em reduzir o número de parcelas em até 41% quando utilizado 4 estratos para uma mesma incerteza relativa de 10%. O uso de uma única métrica de dossel, derivada do Lidar, foi capaz de estratificar uma área de floresta tropical primária, além de gerar informações adicionais, como o índice de área foliar do sub-bosque e o modelo do terreno que podem auxiliar na tomada de decisão para o manejo, conservação e monitoramento de florestas tropicais.

Palavras-chave: Manejo florestal de precisão; Inventário florestal; Amazônia

ABSTRACT

Impact of precision management on tropical forests

Timber forest management is an activity that promotes the maintenance of forest cover in primary forest areas in Brazil. Currently, management techniques are being improved by the development of new geoprocessing technologies such as the Global Positioning Satellite System (GNSS), Airborne Lidar Scanning (ALS) and Remotely Piloted Aircraft (ARPs). The general objective of this work is to present the principles of precision forest management applied to the Amazon region and evaluate the reduction of sampling intensity in the forest inventory from vegetation stratification using Lidar variables. For this, was used a demonstration area of precision forest management located in the experimental field of Embrapa, in Rio Branco, Acre. The study was located in a continuous area of 800 hectares, in open ombrophylous forest with presence of palms, bamboo and dense forest portions. Two data collections were carried out in this area: the census inventory of trees with $DBH \geq 40$ cm, which the sectional area of each tree was calculated; and the Lidar flight made at an altitude of 600 meters, with footprint of 30 cm and density of 14 pts.m². From the Lidar data were processed the digital surface models (DSM), terrain (DTM) and height (CHM), CH_{mean} (average canopy height), roughness (standard deviation of the canopy), $CH_{openness}$ (canopy openness of 15 meters), LAI (leaf area index) and LAI_{under} (LAI between 5 to 12 meters of height). In chapter 01, the data were analyzed in order to demonstrate the application of Lidar to improve the technical activities of the forest management in the Amazon, being: (i) macroplanning of the forest management area (AMF); (ii) micro-planning of the land and hydrography of the annual production unit (UPA); (iii) forest census and sampling; (iv) exploration infrastructure planning; and (v) monitoring. The analysis performed on the data of chapter 02 were: (i) estimation of the structural attributes derived from the field inventory and of the return cloud Lidar for three cell sizes; (ii) Pearson correlation between the field and canopy attributes derived from the Lidar; (iii) cluster analysis for classify strata by the Ward method; (iv) validation (ANOVA) and characterization of stratas (PCA); and (v) reduction of sample estimation intensity by a computer simulation. As result, the generated maps show the accuracy and quality of the Lidar data for mapping of annual production units within the area of forest management, microzoning of the topography, drainage network modeling, identification of rugged relief areas, APP boundary and planning the exploration infrastructure respecting the environmental conditions and timber potential of the study area. The average height of the forest canopy (CH_{mean}), obtained with the Lidar, presented the highest correlation ($r = 0.74$) with the basal area and was used to stratify the vegetation in four forest patterns, with significant difference between them for the field variable. The stratification with CH_{mean} distinguished the forest well for its structural variation gradient and vegetation density profile. The simulation of the stratified inventory versus the completely randomized inventory evidenced the ability of the Lidar Alt_{md} variable to reduce the number of plots by up to 41% when using 4 strata for the same relative uncertainty of 10%. The use of a single canopy metric derived from Lidar was able to stratify an area of primary rainforest, in addition to generating additional information such as understory leaf area index and the terrain model that can assist in decision making for management, conservation and monitoring of tropical forests.

Keywords: Forest management precision; Forest inventory; Amazonia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fronteiras da exploração madeireira na Amazônia brasileira (adaptado de SABOGAL et al., 2006).....	29
Figura 2. Etapas do manejo florestal (BALIEIRO et al., 2010).....	37
Figura 3. Atividades do manejo florestal divididas entre macro e microplanejamento.	38
Figura 4. Funcionamento da telemetria a laser (PETRIE, TOTH, 2018).....	42
Figura 5. Ilustração sobre o funcionamento e equipamentos usados no escaneamento a laser aerotransportado – ALS (<i>Aerial Laser Scanning</i>) (PAPA, et al., 2017).	43
Figura 6. Pontos de retorno da vegetação sobrevoada com Lidar aerotransportado.	44
Figura 7. Modelo digital de superfície (MDT), Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo de Altura do Dossel (MAD) da Unidade Demonstrativa de Manejo Florestal de Precisão da Embrapa, em Rio Branco, AC. (a) nuvem de pontos Lidar com presença de ruído ; (b) modelo digital da superfície com erro gerado pela presença de pontos espúrios; (c) modelo digital do terreno com falha no processo de interpolação.	46
Figura 8. Tridimensionalização da floresta com uso de Lidar aerotransportado.	47
Figura 9. Análise da variável Lidar de intensidade de luz refletida (fonte: D’OLIVEIRA; SILVA, 2017).	48
Figura 10. Vista aérea (a) e de solo (b), em 2007, de uma área de ocorrência de <i>blowdown</i> e, em 2005, no estado do Amazonas, região central da Amazônia (MARRA, 2016).....	48
Figura 11. Análise de métricas de altura em uma área de florestal umbrofila primária no estado do Acre. (a) parcela com predominância de dossel aberto, presença de clareiras, árvores isoladas e ocorrência de espécies como bambu e cipós no estrato inferior da estrutura vertical; (b) parcela com clareiras em estágio de regeneração e presença de árvores jovens; (c) parcela com presença de árvores dominantes e co-dominantes, mas ainda com pequenas aberturas entre as copas; (d) parcela com predominância de dossel fechado, ausência de clareiras e sub-bosque ralo.....	50
Figura 12. Perfil vertical da vegetação em florestas tropicais com difentes padrões estruturais e ecológicos. Quantidade média de retorno em ((a) parcela com predominância de dossel aberto, presença de clareiras, árvores isoladas e ocorrência de espécies como bambu e cipós no estrato inferior da estrutura vertical; (b) parcela com clareiras em estágio de regeneração e presença de árvores jovens; (c) parcela com presença de árvores dominantes e co-dominantes, mas ainda com pequenas aberturas entre as copas; (d) parcela com predominância de dossel fechado, ausência de clareiras e sub-bosque ralo; (e) ilustração do número de retornos em uma vegetação com árvore isolada e abertura de dossel; (f) ilustração do número de retornos em área de floresta alta com dossel fechado.	52

- Figura 13. (a) Ilustração do método de cálculo do modelo de densidade relativa. O valor do MDR é percentual e varia de 0 a 100%. Valores próximos de 80% indicam vegetação do sub-bosque com pouca ou nenhuma perturbação na faixa de 1-5 metros acima do solo. Valores próximos de zero (0%) significa que o sub-bosque foi removido pelas atividades do manejo florestal. Isso acontece quando a divisão o número de retornos acima ou abaixo da na faixa de 1 – 5 m é dividido por zero; (b) imagem do MDR; (c) vetorização da infraestrutura de estrada, pátios, trilhas de arraste e clareira; (d) mapa da infraestrutura após a exploração florestal (adaptado de D' OLIVEIRA et al., 2012 e D'OLIVEIRA; FIGUEIREDO; PAPA, 2014).....53
- Figura 14. (a) Macroplanejamento da propriedade para fins de manejo florestal e; (b) instalação de parcelas em três tipos de amostragem diferentes.....55
- Figura 15. Comparação entre dados coletados em campo (Censo florestal, Densidade de indivíduos e Volumetria) e com Lidar (Topografia do terreno, Altura da floresta e Estratificação).....56
- Figura 16. Modelos de macroplanejamento da(s) Unidade(s) de Produção Anual(is) para elaboração de Plano de Manejo Florestal Sustentável. (a) UPA única; (b) UPAs definidas a partir de plano cartesiano; (c) UPAs definidas a partir das características topográficas e hidrográficas da AMF.....57
- Figura 17. Inventário florestal censitário em uma unidade de produção anual (UPA) para elaboração de Plano Operacional Anual (POA) em um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). (a) Seleção da UPA 02 para elaboração do Plano Operacional Anual (POA); (b) censo florestal na UPA 02; (c) demonstração de inventário florestal com uso de segmentação automática a partir de dados de altimetria a laser; (d) demonstração de inventário florestal com segmentação automática a partir de ortofoto obtida com ARPs (Aeronave remotamente pilotadas).....60
- Figura 18. (a) Microzoneamento do terreno com uso de diferentes fontes de dados altimétricos. (b) modelo digital do terreno com resolução de 1 m²; (c) curvas de nível; (d) modelo do terreno com efeito de sombreamento; (e) mapa de declividade; (f) mapa de zona restritiva (10%).....62
- Figura 19. (a) Microzoneamento da hidrografia a partir de diferentes bases de dados altimétricos; (b) delimitação de igarapés, nascentes e áreas de APP a partir do Lidar; (c) classificação das árvores dentro da APP.....63
- Figura 20. Mapa de exploração da UPA 02 com técnicas de manejo de precisão. (a) Planejamento da infraestrutura de pátios, estradas e trilhas de arraste; (b) área de abrangência do pátio; (c) classificação das árvores.....65
- Figura 1. (a) Área de estudo, Acre; (b) região do entorno da área de estudo, Rio Branco, AC; (c) campo experimental da Embrapa Acre com grade de células; (d) modelo digital do terreno (MDT) com resolução de 1 metro; (e) rede hidrográfica; (f) inventário florestal censitário de 25.957 indivíduos; (g) distribuição da área basal de indivíduos com DAP \geq 40 cm; (h) modelo de altura do dossel (MAD) em resolução de 2 metros.86
- Figura 2. a) Correlograma dos atributos estruturais do dossel (derivados do Lidar) com a área basal (m².ha⁻¹) mensurada em campo; (b) *scree plot* pelo método de Elbow; (c) dendrograma obtido pelo método de Ward e distância Euclideana.92

Figura 3. (a) Análise de dispersão dos dados de área basal (campo) e Altura média do dossel (Alt_{md}); (b) boxplot dos dados de área basal para cada um dos quatro grupos criados na análise de agrupamento com a Altura média do dossel; (c) mapa de células classificadas por estrato. 93

Figura 4. (a) Biplot da PCA das células de 100x100 agrupadas em quatro estratos (cores); (b) perfil da vegetação médio para os estratos; (c) característica média do MAD em uma célula de 1 ha para cada estrato (a parcela foi selecionada de acordo com o valor médio da altura do dossel); (d) nuvem de pontos das células selecionadas dentro de cada estrato. 94

Figura 5. Simulação computacional do inventário estratificado em quatro estratos ($K = 4$) (azul) *versus* inteiramente casualizado (vermelho) para três tamanhos de parcelas: (a) 100 x 100 metros; (b) 70 x 70 metros; e (c) 50 x 50 metros. 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Métricas de altura de dados Lidar em quatro parcelas de 1 hectares localizados em uma área de floresta umbrófila primária no estado do Acre. Cada uma das parcelas representa um padrão distinto de estrutura da vegetação: (a) parcela com predominância de dossel aberto, presença de clareiras, árvores isoladas e ocorrência de espécies como bambu e cipós no estrato inferior da estrutura vertical; (b) parcela com clareiras em estágio de regeneração e presença de árvores jovens; (c) parcela com presença de árvores dominantes e co-dominantes, mas ainda com pequenas aberturas entre as copas; (d) parcela com predominância de dossel fechado, ausência de clareiras e sub-bosque ralo. 50

Tabela 2. Estimativa da Área de Preservação Permanente e Área útil de uma área de floresta primária com uso modelagem de bacias hidrográficas a partir de quatro diferentes dados altimétricos. 64

Tabela 1. Sumário estatístico dos atributos da vegetação para os quatro estratos. DP (desvio padrão da área basal em $m^2 \cdot ha^{-1}$); LAI (índice de área foliar em $m^2 \cdot m^{-2}$). 92

Tabela 2. Estimativa de redução da intensidade amostral para inventário estratificado em k estratos para tamanhos de parcelas de 1, 0,5 e 0,25 hectare. a* Número de estratos selecionado pelo método de Elbow. ** Número de estratos sem diferença significativa em pelo menos um par de estratos. NA (*not available*) número de parcelas menor que dois em pelo menos um dos estratos. 94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMF	Área de Manejo Florestal
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
APP	Área de Preservação Permanente
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> (radiômetro de reflexão e emissão térmica orbital)
CAR	Cadastro Ambiental Rural
EC	Exploração convencional
EIR	Exploração de impacto reduzido
GEDI	<i>Global Ecosystem Dynamics Investigation</i> (estudo global da dinâmica de ecossistemas)
GLAS	<i>Geoscience Laser Altimeter System</i> (sistema geocientífico de altimetria a laser)
Glonass	<i>Global Navigation Sputnik System</i> (sistema global de navegação russo)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (sistema global de navegação por satélite)
GPS	<i>Global Position System</i> (sistema de posicionamento global)
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (unidade de medição inercial)
Laser	<i>Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação)
Lidar	<i>Ligth Detection and Ranging</i> (detecção e distanciamento da luz)
MAD	Modelo de altura do dossel
MDT	Modelo digital do terreno
MDS	Modelo digital de superfície
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
POA	Plano operacional annual
Modelflora	Modelo digital de exploração florestal
QR code	<i>Quick Response code</i> (código de resposta rápida)
RL	Reserva Legal
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (missão do ônibus espacial <i>de topografia por radar</i>)
UPA	Unidade de produção permanente
3D	Três dimensões

1. INTRODUÇÃO

Vivemos uma realidade em que qualquer conhecimento especializado está à nossa disposição, imediatamente, por meio do acesso à internet, pelo computador ou dispositivos móveis (ANDERSON, 2016). O acesso instantâneo a qualquer tipo de informação modifica a maneira como nós nos relacionamos com as pessoas, a forma como andamos pela cidade, os padrões de consumo e até mesmo o nosso vocabulário, que se renova na medida em que as invenções do mundo moderno são criadas e incorporadas ao nosso dia a dia (ALMEIDA, 2007).

Essa velocidade de acesso à informação vem influenciando também a maneira como vemos, interpretamos e interagimos com a natureza, seus serviços e recursos ecossistêmicos. Hoje é possível, por exemplo, viajar no tempo e ver o histórico de desmatamento de uma determinada região, com apenas alguns cliques, usando um programa de computador conectado à internet – projeto MapBiomias (MAPBIOMAS, 2018); ou acessar uma lista personalizada de espécies para a restauração florestal a partir da localização geográfica de interesse – projeto Webambiente (BRASIL, 2017); e até mesmo saber o nome do produtor da castanha-do-brasil que consumimos, acessando o QR code impresso na embalagem do produto – projeto Selo Origens (IMAFLOA, 2017). Estes e muitos outros casos de integração da tecnologia da informação com atividades relacionadas à área ambiental proporcionam a nós, protagonistas, e, ao mesmo tempo, beneficiários desse processo, uma compreensão mais profunda e contextualizada da realidade em que estamos inseridos, modificando a forma como desempenhamos nosso papel na conservação e uso dos recursos naturais.

Nas atividades de manejo florestal madeireiro na Amazônia não é diferente. As mudanças já vêm acontecendo há pelo menos uma década, modificando, desde as atividades mais elementares, como o mapeamento das árvores, até aquelas mais complexas, como o monitoramento do crescimento da floresta após a exploração (BRAZ, et al., 2007). A fonte desta transformação está no espaço e chama-se Sistema Global de Posicionamento por Satélite (GNSS – sigla em inglês para Global Navigation Satellite System) (MIRANDA, 2005; MOLIM; AMARAL; COLAÇO, 2015; MONICO, 2007). O aumento da quantidade e qualidade do sinal dos satélites a partir dos anos 2000, juntamente com o desenvolvimento de receptores mais potentes, tornaram o mapeamento geográfico algo prático, acessível e preciso, mesmo em

condições adversas, como abaixo da cobertura fechada da copa das árvores (GARMIN, 2007;2014; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; FIGUEIREDO; CUNHA, 2007; FIGUEIREDO et al., 2009). Com isso, o manejo florestal na Amazônia passou por uma inovação, entrando na fase do manejo florestal de precisão (PAPA; FIGUEIREDO, 2011).

À medida que a tecnologia evolui, novas oportunidades de melhoria são naturalmente implementadas no manejo. O mapeamento tridimensional da floresta, com uso de laser, é um exemplo disso (PAPA, et al., 2017). O laser é uma invenção da década de 60 (SILVA NETO; FREIRE JÚNIOR, 2017), portanto, relativamente recente, e seu uso é mais comum do que imaginamos. O leitor do código de barras, usado nos supermercados, por exemplo, é a laser (ANGELOPOULOU; JR WRIGHT, 1999) e seu princípio de funcionamento é muito parecido com aquele aplicado na área florestal. O equipamento a laser emite luz própria, que atinge o objeto (código de barras ou uma árvore) e tem parte da luz refletida pelos espaços em branco (do código) ou por folhas, galhos e tronco (da árvore) (BLASCHKE; CLÄSSER; LANG, 2007).

A diferença entre esses dois objetos é que a luz refletida, captada pelo sensor do supermercado, é decodificada em fração de segundos por um programa de computador, que informa o nome e o preço do produto ao cliente. Já no mapeamento florestal, os retornos captados pelo sensor a laser são coordenadas geográficas em três dimensões (xyz), que precisam ser processadas e correlacionadas com dados de campo para gerar informações relevantes para o planejamento e manejo florestal (D'OLIVEIRA et al., 2012; FIGUEIREDO, 2014). O equipamento laser embarcado em uma aeronave é capaz de representar, com alta precisão, características da paisagem florestal, tais como: altura e localização das árvores; estimativa de biomassa; índice de vegetação; topografia do terreno; monitoramento ambiental; delimitação de rios; e área de preservação permanente, dentre outras (ALMEIDA, et al., 2016; CENTENO; MITISHITA, 2008; D'OLIVEIRA; FIGUEIREDO; PAPA, 2014; LEFSKY, et al., 2002; SILVA, et al., 2018; STARK, et al., 2015; VASTARANTA, 2012).

Já existem iniciativas em que o mapeamento da vegetação é feito a laser pelo espaço - projetos GLAS e GEDI (NASA, 2018). Desse modo, está muito próximo o momento em que se realizará, na Terra, o monitoramento das florestas em 3D, com precisão sub-métrica e contínuo.

Outro avanço tecnológico que está revolucionando o manejo florestal de precisão é a fotogrametria por meio de drones (FIGUEIREDO; PAPA; D'OLIVEIRA, 2015). A técnica de medir distâncias e dimensões reais dos objetos por meio da fotografia é antiga, data do final do século 19 (ALBERTZ, 2007), mas atualmente, embarcada em aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), tem sido utilizada nas mais diversas áreas, como a engenharia, a fiscalização, a conservação, a cultura e o lazer. Na área florestal, esse equipamento já tem várias formas de aplicação, dentre as quais, o monitoramento e combate de incêndios florestais, fiscalização de desmatamento ilegal, medição volumétrica de madeira em pátio, identificação e contagem de árvores (FIGUEIREDO et al., 2016). Em um futuro breve, o emprego de drones como instrumentos de trabalho na área florestal se fará de maneira normal, assim como receptores GNSS nos dias de hoje.

De forma geral, nota-se que o tipo e a qualidade das informações referentes à área a ser manejada são fundamentais para a tomada de decisão do gestor florestal, pois, quanto melhor conseguirmos recriar a realidade florestal no ambiente virtual, mais assertivos serão nossos modelos, simulações e soluções para intervir ou não em uma área de floresta nativa. Nesse sentido, o uso combinado de sensores é uma metodologia na vanguarda dessa revolução geotecnológica que vivenciamos (SHAN; TOTH, 2018; TYMEN, 2017), pois permite uma melhor representação e análise da realidade florestal com uso simultâneo de dados espaciais, como laser, satélite, GNSS e drones, operando de modo bi e tridimensional.

O manejo florestal de precisão promove a fusão entre o real e o virtual, permite enxergar a floresta por múltiplas dimensões, provê o gestor com informações, antes impossíveis de se obter por meio analógico, possibilita simular, experimentar, inventar, errar e corrigir, sem qualquer limitação ou prejuízo ao plano real. Essa interação entre a realidade e o meio digital é que faz um projeto de manejo florestal ser implementado em campo com grande exatidão, resultando em menor impacto ambiental e maior produtividade nas atividades exploratórias. Com a chegada da era da indústria 4.0 no setor florestal, o manejo florestal de precisão tende a continuar se modificando, e desta vez, com a influência da internet das coisas, análise de *big data*, processamento em nuvem e otimização de processos com a inteligência artificial.

1.1. Organização do conteúdo

Esta dissertação explora o desenvolvimento das técnicas de manejo florestal de precisão com enfoque na região amazônica e na tecnologia de altimetria a laser aerotransportado. Para tratar desses assuntos, este documento está organizado da seguinte forma: introdução, capítulo 01, capítulo 02 e conclusão.

O capítulo 01: Princípios do manejo florestal de precisão para exploração madeireira na Amazônia, trata-se de uma revisão bibliográfica sobre o histórico do manejo florestal na região amazônica e faz um resgate das principais técnicas implementadas ao longo do tempo até chegar aos dias atuais. Essa parte do documento contextualiza o leitor sobre a evolução das técnicas de manejo florestal no Brasil e nivela os principais conceitos e desafios relacionados ao assunto.

Em seguida, o capítulo traz um apanhado sobre o fundamento da tecnologia Lidar, seu funcionamento e aplicações na área florestal. Para isso, foram utilizados os dados Lidar da unidade demonstrativa da Embrapa, os quais serviram de exemplo para ilustrar o significado ecológico de algumas de suas métricas e seu potencial de uso no manejo de precisão em florestas tropicais.

Por fim, o capítulo 01 explora as principais modificações que a geotecnologia proporcionou ao manejo florestal na Amazônia e como elas podem ser aplicadas nas diferentes etapas do planejamento. Vale lembrar que a adoção das técnicas de precisão no setor florestal da Amazônia encontra-se em curso, porém envolve mudanças complexas, que variam de região para região e carecem de casos na bibliografia que possam servir de exemplo para ações de treinamento e divulgação. Por esse motivo, essa parte da dissertação está acompanhada de exemplos práticos implementados na unidade demonstrativa de manejo florestal de precisão, de 800 hectares, localizada no Campo Experimental da Embrapa Acre.

Na sequência, apresenta-se o capítulo 02: Como reduzir a intensidade amostral do inventário em florestas tropicais a partir do Lidar? Esse capítulo explora a capacidade do Lidar para mapear e estratificar a vegetação a partir da altura do dossel, com o propósito de reduzir a intensidade amostral de campo durante o inventário florestal. A pesquisa faz parte de um conjunto de trabalhos científicos que buscam validar e incorporar a altimetria a laser no planejamento, gerenciamento e monitoramento de florestas no mundo. Contextualiza-se a pesquisa com programas da política florestal nacional, como as Concessões de Florestas Públicas e o

Inventário Florestal Nacional, pois, através dela, tenciona-se demonstrar o quanto o Lidar é eficiente na caracterização da vegetação e assim, estimar os parâmetros populacionais com menor trabalho de campo.

A rotina de processamento e análise dos dados da pesquisa foi feita toda no programa R e os *scripts* estão disponibilizados no repositório do autor, juntamente com a base de dados (<https://github.com/DanielPapa>).

Por fim, a dissertação chega à conclusão, com um apanhado dos principais aspectos analisados ao longo do trabalho, e com a apresentação de sugestões de estudos futuros que sejam decisivos para a continuidade do aperfeiçoamento das técnicas de manejo florestal de precisão, com a finalidade de conservação e uso sustentável da floresta Amazônica.

1.2 Objetivos do trabalho / hipótese

O objetivo geral deste trabalho é apresentar os princípios do manejo florestal de precisão aplicados para a região amazônica e avaliar a capacidade dos dados do Lidar na redução da intensidade amostral no inventário florestal. Para tal, foi utilizada uma base de dados georreferenciada, composta por imagens de satélite, radar, drone, Lidar e dados de campo (inventário 100% e mapeamento dos cursos d'água), em uma área contínua de floresta primária no estado do Acre.

Os objetivos específicos da dissertação são:

- Analisar características ecológicas, estruturais e físicas de uma área contínua de floresta primária com uso de técnicas de sensoriamento remoto, posicionamento global por satélites e sistema de informações geográficas;
- Identificar e caracterizar padrões na estrutura horizontal e vertical da vegetação com uso de dados do Lidar para avaliar a redução da intensidade amostral em inventários florestais na Amazônia.

As hipóteses da pesquisa são:

- A partir dos dados do Lidar podem ser produzidas informações sobre a estrutura da floresta, as quais são importantes para o planejamento da exploração madeireira e aperfeiçoamento das técnicas de manejo florestal de precisão em florestas tropicais.
- A altura do dossel da floresta, obtida a partir de dados do Lidar, é boa indicadora da variação da área basal de árvores com potencial madeireiro.

REFERÊNCIAS

- ANGELOPOULOU, E.; JR WRIGHT, J.R. **Laser Scanner Technology**. Technical Reports, University of Pennsylvania, PA: Penn Libraries, 1999, p. 6-28.
- ALBERTZ, J. A Look Back: 140 years of “Photogrammetry”. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. Berlin, Germany, 2007, p. 204-205. Disponível em < <https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2007journal/lookback.pdf> >. Acesso em: 27 ago.2018.
- ALMEIDA, C.M. O Diálogo entre as dimensões Real e Virtual do Urbano. In: ALMEIDA, C.M; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. (Ed.). **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007, p. 19-33.
- ANDERSON, C. **TED Talks: o guia oficial do TED para falar em público**; tradução Donaldson Garchagen e Renata Guerra – 1.ed. – Rio de Janeiro: Intrínseca, 240p., 2016.
- BLASCHKE, T.; CLÄSSER, C; LANG, S. Processamento de Imagens num Ambiente Integrado do SIG / Sensoriamento Remoto – Tendências e Consequências. In: KUX, H.; BLACHKE, T. **Sensoriamento remoto e SIG avançados: novos sistemas sensores: métodos inovadores**; tradução Herman Kux – 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, p. 11-18.
- BRASIL. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Ministério do Meio Ambiente (MMA). **WebAmbiente**. Disponível em <<https://www.webambiente.gov.br>>. Acesso em: 02 abr.2018.
- BRAZ, M. E.; FIGUEIREDO, E. O.; D’OLIVEIRA, M. V. N.; PASSOS, C. A. M. Manejo florestal de precisão: modelo digital de exploração e manejo de florestas naturais. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d’ (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007, p. 17-29.
- CENTENO, J.A.S.; MITISHITA, E.A. *Laser Scanner* Aerotransportado no estudo de áreas urbanas. In: ALMEIDA, C.M; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. (Ed.). **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007, p.193-208.

- 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, set. 2012.
- D'OLIVEIRA, M. V. N de; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. A. de. **Uso do Lidar como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 130 p.
- FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007.
- FIGUEIREDO, E. O.; CUNHA, R. M. da. Levantamento das árvores com coordenadas apropriadas com GPS de alta sensibilidade. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d' (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007, p. 103-118.
- FIGUEIREDO, E. O.; MOURA, D. C. de S.; FIGUEIREDO, S. M. M.; PAPA, D. de A. **Modelagem da hidrografia em planos de manejo e critérios para definição de árvores em APP pelo Modeflora**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2009. (Série Embrapa Acre, Circular Técnica, 50).
- FIGUEIREDO, E. O. **Modelagem biométrica para arvores individuais a partir do Lidar em área de manejo de precisão em florestas tropicais na Amazônia Ocidental**. 86, 2014. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus/AM, 2014.
- FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. A.; D' OLIVEIRA, M. V. N. **Mapeamento Rural 3D de Precisão com o uso do Drone: a base para a vanguarda do planejamento florestal**. In: CONGRESSO REGIONAL DE PESQUISA DO ESTADO DO ACRE, 1.; SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFAC, 24. **Anais...** Rio Branco: CNPQ; UFAC; EMBRAPA; FAPAC; IEVAL, 2015.
- FIGUEIREDO, E.O.; PAPA, D.A.; D'OLIVEIRA, M.V.N. **Estimativa do volume de madeira em pátios de estocagem de toras por meio de câmeras RGB instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP)**. Rio Branco, Acre: Embrapa, Acre, 2016. (Série Embrapa Acre, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 55).
- GARMIN. GPSMAP 76 Cx Sirf Star, 2007.

- GARMIN. GPSMAP 64 s Helix Quad GLONASS, 2014.
- IMAFLOA. **Origens Brasil**. Disponível em <<http://www.origensbrasil.org.br>>. Acesso em: 12 set.2017.
- LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; PARKER, G. G.; HARDING, D. J. Lidar remote sensing for ecosystems studies. **BioOne Research Evolved**, v. 52, n. 1, p. 19-30, jan. 2002.
- MAPBIOMAS. **Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil**. Disponível em < <http://mapbiomas.org>>. Acesso em: 20 ago.2018.
- MIRANDA, J.I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília, DF. Embrapa Informação Tecnológica, 425p., 2005.
- MOLIM, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 224 p.
- MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2.ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008.
- NASA. **Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI)**. Disponível em: < <https://gedi.umd.edu>>. Acesso em 20.ago.2018.
- PAPA, D. A.; FIGUEIREDO, E. O.; **Modelflora – Modelo Digital de Exploração Florestal**. Rio Branco, AC: Centro de Pesquisa Agroflorestal do Acre, 2011. (Série folder).
- PAPA, D. DE A.; FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N. d'; RODRIGUEZ, L. C. E.; CAMARGO, A. P.; PRATA, G. A.; AMARAL, L. G. de C.; LARANJA, D. C. F.. **Uso do Lidar no manejo florestal**. p. 2, 2017. (Série Folder).
- SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning**: principles and processing. 2. ed. Boca Raton, FL: 13:978-1-4987-7227-3, 2018. v. 31
- SILVA NETO, C. P. DA; FREIRE JÚNIOR, O. Um Presente de Apolo: lasers, história e aplicações. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 2017, p. 1–10. Disponível em < <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v39n1/1806-1117-rbef-39-01-e1502.pdf>>. Acesso em: 13 mar.2018.
- SILVA, C. A.; SAATCHI, S.; GARCIA, M.; LABRIÈRE, N.; KLAUBERG, C.; FERRAZ, A.; MEYER, V.; JEFFERY, K. J.; ABERNETHY, K.; WHITE, L.; ZHAO, K.; HUDAK, A. T. Comparison of small- and large-footprint lidar characterization of tropical forest aboveground structure and biomass: a case study from central Gabon. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, p. 1-15, abr. 2018.

- STARK, S.C.; ENQUIST, B.J.; SALESKA, S.R.; LEITOLD, V.; SCHIETTI, J.; LONGO, M.; ALVES, L.A.; CAMARGO, P.B.; OLIVEIRA, R.C. Linking canopy leaf area and light environments with tree size distributions to explain Amazon forest demography. **Ecology Letters**, v.18, n.7, p. 636–645, 2015.
- TYMEN, B. et al. **Quantifying micro-environmental variation in tropical rainforest understory at landscape scale by combining airborne LiDAR scanning and a sensor network**. *Annals of Forest Science*, v. 74, n. 2, 2017.
- VASTARANTA, M. **Forest mapping and monitoring using active 3D remote sensing**. 45 f. 2012. *Dissertationes Forestales 144* – Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki, Finlândia, 2012.

2. PRINCÍPIOS DO MANEJO FLORESTAL DE PRECISÃO PARA EXPLORAÇÃO MADEIREIRA NA AMAZÔNIA

RESUMO

O manejo florestal na Amazônia está passando por uma evolução tecnológica com a transformação das técnicas analógicas de coleta e análise de dados por processos digitais capazes de representar a paisagem florestal no ambiente computacional com alta precisão. A evolução para o manejo florestal de precisão é fruto do desenvolvimento de novos sensores, equipamentos e algoritmos de processamento que proporcionam aos gestores florestais uma grande quantidade de informação que auxiliam na tomada de decisão e permitem que sejam elaborados e implantados planos de manejo florestal adaptados para cada tipo de floresta, obtendo assim menor impacto ambiental e maior rendimento nas atividades de campo. O Sistema Global de Posicionamento por Satélite (GNSS), o Lidar (Ligth detection and ranging) aerotransportado e as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) estão na vanguarda do manejo florestal de precisão. Dentre estas o Lidar se diferencia dos demais por se tratar de um sensor ativo capaz de captar, com acurácia centimétrica, o gradiente de variação da vegetação de forma tridimensional, bem como as variações do terreno. Essa propriedade da altimetria a laser tem grande aplicação no aperfeiçoamento das técnicas do manejo florestal na amazônia, sendo elas: (i) macroplanejamento da Área de Manejo Florestal (AMF); (ii) microplanejamento do terreno e hidrografia da Unidade de Produção Anual (UPA); (iii) censo e amostragem florestal; (iv) planejamento da infraestrutura de exploração; e (v) monitoramento.

Palavras-chave: Manejo florestal de precisão; Modelflora; Amazônia

ABSTRACT

Forest management in the Amazon is passing through a technological evolution by transforming the analog techniques of collect and analyse data by digital processes capable the represent the forest landscape with high precision in operating environment. The precision forestry management is evolving with the development of new sensors, equipment and processing algorithms that provide forest managers a large amount of information that helps to elaborate and to implement forest management plans adapted to each type of forest. It results lower environmental impact and higher productivity field activities. The Global Positioning Satellite System (GNSS), Airborne Lidar Scanning (ALS) and Remotely Piloted Aircraft (ARPs) are at the forefront of precision forestry management. Among these, the Lidar differs from the others because it is an active sensor capable of capturing, with centimetric accuracy, the gradient of vegetation variation in three-dimensional shape, as well as the terrain variations. This property of laser altimetry has great application in the improvement of the techniques of forest management in the Amazon, as: (i) macro-planning of the Forest Management Area (FNA); (ii) micro-planning of the land and hydrography of Annual Production Unit (UPA); (iii) census and sampling inventories; (iv) exploration infrastructure planning; and (v) monitoring.

Keywords: Forest management precision; Modelflora; Amazonia

2.1. Objetivo

Esse capítulo tem como objetivo geral explicar as aplicações que o levantamento a laser aerotransportado pode trazer ao manejo florestal na Amazônia. Os objetivos específicos dessa revisão de literatura são:

- Fazer uma contextualização histórica da exploração madeireira na região amazônica e da evolução das técnicas empregadas nas etapas do manejo de florestas nativas;
- Explicar os princípios e etapas de um plano de manejo florestal sustentável;
- Apresentar o funcionamento da tecnologia Lidar (*Ligth detection and ranging*) e suas principais aplicações no manejo de florestas tropicais;
- Demonstrar as principais técnicas de manejo florestal de precisão em uma área contínua de floresta tropical primária localizada no estado do Acre;

2.2. História do manejo florestal na Amazônia

O relato histórico do manejo florestal na Amazônia brasileira pode ser descrito em quatro momentos, desde meados do século XVII até os dias atuais. Nota-se que, ao longo desse período, houve modificações graduais nos métodos de exploração, em função da quantidade e qualidade das informações disponíveis a respeito da floresta, em diferentes épocas (HOMMA, 1993; HOMMA, 2003).

As condições de acesso ao recurso florestal também foram decisivas na definição dos métodos de extração, transporte e intensidade de corte implementados na Amazônia em toda a sua história recente de uso e ocupação (VERÍSSIMO et al., 1992).

2.2.1. Exploração extrativista

O extrativismo de produtos madeireiros e de uso múltiplo da floresta faz parte da primeira fase de exploração dos recursos vegetais na região amazônica (HOMMA, 1993; LENTINI et al., 2005), cujo início se deu há mais de trezentos anos na zona estuarina da bacia amazônica (RANKIN, 1985). Naquela época, o principal transporte, tanto para as pessoas como para as mercadorias e madeiras, utilizava as vias fluviais (VALOIS, 2003), com embarcações que ainda têm uma importante função social na região.

A madeira extraída da floresta, subordinada à sazonalidade das chuvas, era aproveitada apenas localmente. O seu uso de subsistência, tendo como destino principal a construção de moradias para a população, aliava-se a outro, voltado a um mercado consumidor restrito que necessitava de material para a fabricação de embarcações (VERÍSSIMO et al., 1992). Durante os séculos XVIII e XIX, a madeira era explorada de modo incipiente, e não havia um ambiente propício que lhe conferisse a devida importância econômica, tal como acontecia com a borracha e o cacau (LENTINI; VERÍSSIMO; SOBRAL, 2003; VALOIS, 2003).

A partir de 1940, com base na ponderação de que a cultura extrativista amazônica seria sinônimo de atraso econômico, a agropecuária surgiu como alternativa de produção, provocando a ocupação sistemática das várzeas dos rios (HOMMA, 2003).

2.2.2. Exploração de Alto impacto

A inauguração da Nova Capital, em 1960, fez com que o cenário se modificasse nas regiões centro-oeste e norte, principalmente com a implantação da malha viária, que tinha, como uma de suas motivações, a oficialização do modelo exploratório de “desenvolvimento” para a região amazônica, baseado no lema “Integrar para não entregar” (HOMMA, 2003; VERÍSSIMO et al., 1992). Assim, com esse fundamento, a região ganhou rodovias, como a Belém-Brasília, e assistiu à construção de vilas e cidades, à atividade madeireira, ao desmatamento, e à intensificação da agropecuária (HOMMA, 2003).

O foco da exploração madeireira, nesse período, migrou da várzea estuarina do Rio Amazonas para o sul e o leste da região amazônica, nos estados do Mato Grosso, Pará, Tocantins, Maranhão e Rondônia (Figura 01), tornando-se uma atividade base, fundamental para o crescimento econômico daquela região durante décadas (GARRIDO FILHA, 2002).

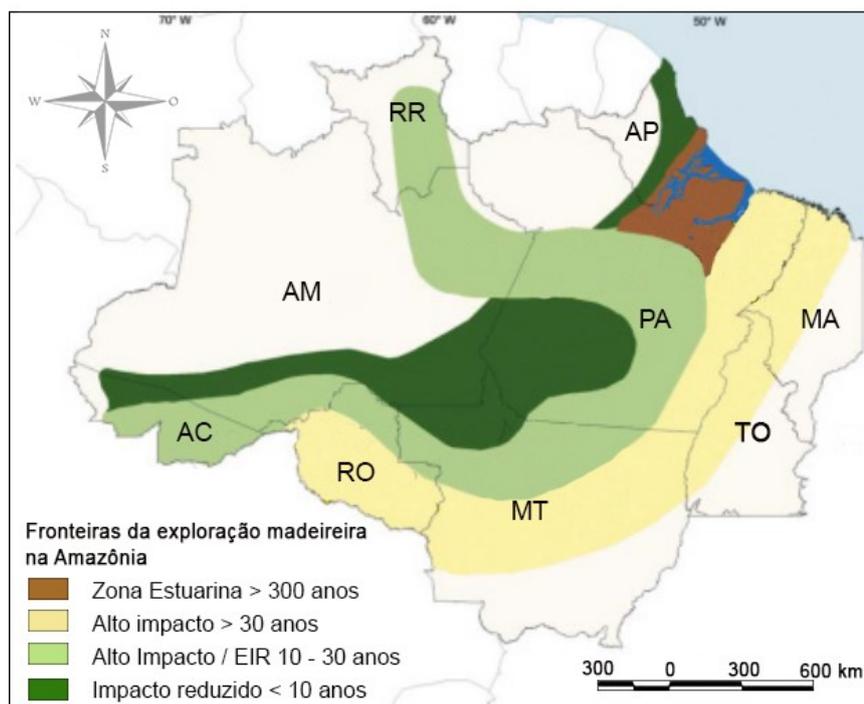


Figura 1. Fronteiras da exploração madeireira na Amazônia brasileira (adaptado de SABOGAL et al., 2006).

Em 1965, a criação do Código Florestal representou um marco na legislação ambiental brasileira, trazendo, em seu artigo 15, a condição expressa de se elaborar planos de manejo para utilização da floresta amazônica, sendo que esse protocolo foi normatizado anos depois, ou seja, em 1989 (FREITAS, 2010). Nesse intervalo de aproximadamente três décadas, a Amazônia tornou-se um palco para exploração dos seus recursos, e de forma mais intensa que na fase anterior. A extração madeireira e o desmatamento descontrolado funcionaram como um pretexto para a ocupação da região sem qualquer controle do impacto dessas atividades na floresta e na população local (VALOIS, 2003).

Devido à falta de madeira nas regiões sul e sudeste do Brasil, incentivou-se a atividade florestal na Amazônia (GARRIDO FILHA, 2002), um lugar amplamente favorável porque ampliavam-se as fronteiras agrícolas na região centro-norte. Entretanto, não havia um planejamento, e nem mesmo qualquer tipo de preocupação com a manutenção dos seus recursos para as épocas futuras (GARRIDO FILHA, 2002; LENTINI et al., 2005). Diante da procura por recursos e demanda por áreas livres, as cidades, lavouras, pastagens e indústrias substituíram, gradativamente e de forma absoluta, as áreas que antes eram preenchidas pela floresta (VERÍSSIMO et al., 1992; VERÍSSIMO; PEREIRA, 2014).

Determinados autores se manifestam sobre esse tipo de exploração, denominando-a de convencional (EC) (HOLMES et al., 2002; IFT, 2014; LENTINI et al., 2005; SABOGAL et al., 2006; WEST; VIDAL; PUTZ, 2014), pois se baseiam nas características da atividade, que, habitualmente, era realizada sempre a partir das mesmas ações e comportamentos:

- 1) o aproveitamento de poucas espécies (< 10);
- 2) o descaso com árvores remanescentes na derrubada;
- 3) a colheita com máquinas adaptadas do setor agrícola;
- 4) a abertura de estradas e pátios sem planejamento;
- 5) o despreparo do pessoal do campo; e
- 6) muito desperdício de madeira.

A forma de exploração do tipo convencional não leva em conta que a floresta, para se recuperar, impulsiona uma capacidade natural limitada (IFT, 2014). Por essa razão, considera-se como uma exploração de alto impacto.

Na medida em que as espécies de maior valor e os recursos florestais se esgotaram, os polos madeireiros migraram para novas fronteiras, atraídos pelos estoques de floresta primária, existentes nos estados do Acre, Amapá, centro do Amazonas e do Pará (VERISSIMO et al., 1992). Algumas regiões, como o polo madeireiro de Paragominas-PA, sofreram três ciclos de corte em um intervalo de 10 anos, comprometendo a continuidade da atividade madeireira na Amazônia nesses moldes (FERREIRA et al., 1999).

A falta de benefícios sociais concretos e com prejuízos ambientais nítidos, oriundos do alto impacto da exploração madeireira na Amazônia, ao longo das décadas de 60, 70 e 80, gerou repercussão negativa no mercado consumidor nacional e na comunidade internacional (FERREIRA et al., 1999; SABOGAL et al., 2006). Então, a partir da década de 90, o conceito de plano de manejo ganhou força e se materializou em forma de regulamentações federais e técnicas de exploração que objetivam assegurar a preservação da floresta, com benefícios sociais e viabilidade econômica (LENTINI et al., 2005).

2.2.3. Exploração de Impacto Reduzido

A fase da exploração com impacto reduzido é marcada pelo conjunto de iniciativas que estimulam a adoção de boas práticas exploratórias na atividade florestal. A prática principal diz respeito à obrigatoriedade de se solicitar o licenciamento ambiental para a realização de atividades madeireiras.

Com base nas técnicas exploratórias e nos parâmetros técnicos expressos na Resolução CONAMA n. 406, de 02 de fevereiro de 2009, deve-se elaborar um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) para exercer tais atividades (CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 2009).

As diretrizes para a exploração de impacto reduzido (EIR) foram compiladas no final da década de 90 por um grupo de instituições a partir da análise de artigos, manuais e estudos de casos de procedimentos técnicos para manejo de florestas tropicais no Brasil e no mundo (SABOGAL et al., 2000). A EIR consiste na implementação de uma série de procedimentos pré e pós-exploração que têm por objetivo a proteção das árvores remanescentes, a minimização dos danos ao solo, a prevenção dos acidentes de trabalho e a proteção do ecossistema florestal (IFT, 2014; SABOGAL et al., 2000).

Além de benefícios ambientais, a EIR trouxe redução de custos na atividade florestal, pois o planejamento das operações aumentou a eficiência nas atividades de colheita da madeira (HOLMES et al., 2002). Alguns dos principais procedimentos da EIR são: delimitação da área a ser explorada por ano; mapeamento e medição de todas as árvores com diâmetro mínimo de corte (censo florestal); mapeamento de rios e topografia do terreno (microzoneamento); corte direcionado das árvores; locação e dimensionamento padronizado de estradas e pátios; monitoramento da regeneração da floresta após a intervenção (HOLMES et al., 2002; IFT, 2014; SABOGAL et al., 2006).

Aos poucos, as técnicas de EIR foram incorporadas às normativas que regulamentam a elaboração dos Planos de Manejo, e assim, parte delas passou a ser adotada obrigatoriamente por empresas do setor florestal na primeira década dos anos 2000. Com a disseminação e adoção dessas técnicas de impacto reduzido em diversas regiões da Amazônia, surgiram situações em que o planejamento sistemático de pátios e estradas prescrito pelas diretrizes da EIR não funcionou tão bem como na região onde elas foram validadas. Como consequência, frequentemente, observa-se

em planos de manejo florestal a locação de pátios em áreas com pouco volume de madeira, construção excessiva de pontes, abertura de estradas em áreas de difícil acesso, mapeamento de árvores com erro médio de 30 metros, dentre outros (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007). A limitação do planejamento sistemático, decorrente da implantação da EIR em diferentes regiões da Amazônia, pode ser explicada pela heterogeneidade da floresta tropical, evidenciada com os distintos padrões de distribuição de suas espécies arbóreas, tipologias florestais, relevo, hidrografia e variedade dos solos (CLARK; CLARK, 1996; CONDÉ; TONINI, 2013; FIGUEIREDO et al., 2015; NIJLAND et al., 2015), e considera-se que estes fatores dificultam a precisão necessária ao planejamento da exploração (BRAZ, 1994).

2.2.4. Manejo florestal de precisão

Depois de um longo período de estagnação, o manejo florestal na Amazônia presenciou, na última década, o crescimento das geotecnologias, notadamente com a inovação trazida pelo Sistema Global de Posicionamento por Satélite (GNSS – sigla em inglês para *Global Navigation Satellite System*), que possibilitou o aperfeiçoamento das técnicas de EIR para uma nova geração do planejamento florestal na Amazônia: o Manejo Florestal de Precisão (BRAZ; MATTOS, 2015; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

Destaca-se que a tecnologia colaborou para uma transformação completa da forma de se mapear e planejar as atividades de manejo na Amazônia, a começar pelo método de coleta de dados no inventário florestal e na caracterização do relevo e hidrografia. Nesses processos, o trabalho é auxiliado por equipamentos digitais, com uso integrado do sensoriamento remoto, sistema de informação geográfica e o GNSS (RIBEIRO, 2002; BRAZ, et al., 2007). Essa mudança aumentou o nível de detalhamento das informações de campo, permitindo que os gestores florestais levem em consideração a heterogeneidade intrínseca das florestas, de maneira a propiciar o tratamento diferenciado a cada elemento particular da área a ser manejada. Assim como ocorre com a EIR, as técnicas de planejamento de precisão contribuem para a redução de impactos provenientes de atividades de manejo florestal, e ainda proporcionam ganhos econômicos. Estudos indicam, por exemplo, a redução média de custos de, pelo menos 30%, na elaboração e execução de planos de manejo florestal, em relação aos valores gastos com o método analógico, cujas técnicas não

são tão precisas (FIGUEIREDO; LIMA, 2008). Verificou-se também, com a prática, que o erro médio na localização de árvores ficou reduzido para 3 metros (FIGUEIREDO; CUNHA, 2007) e que a delimitação de árvores dentro da Área de Preservação Permanente (APP) é realizada com até 98,23% de acertos (FIGUEIREDO et al., 2009).

Todos os benefícios obtidos com a precisão dos instrumentos foram facilitados quando a disponibilidade do GPS (sigla em inglês para Sistema de Posicionamento Global) deixou de ser seletiva, uma vez que, no início dos anos 2000, seu sinal foi desligado pelo governo norte-americano (MOLIM; AMARAL; COLAÇO, 2015). Uma nova geração de aparelhos mais potentes foi desenvolvida para a recepção dos sinais de satélite, e pode-se citar como exemplo os modelos de navegação com chip Sirf Star III (GARMIN, 2007) e antena *quad helix* (GARMIN, 2014).

A conjunção desses fatores permitiu o mapeamento confiável e eficiente de árvores e igarapés com uso de receptores de navegação, em detrimento das condições adversas da floresta amazônica, como, por exemplo, nos locais situados abaixo da copa fechada das árvores, ou, sob céu coberto por nuvens.

O manejo florestal de precisão se distingue por obedecer aos seguintes princípios:

- (i) o mapeamento das árvores é realizado com a utilização de coordenadas geográficas verdadeiras;
- (ii) para definição do microzoneamento do relevo, são produzidas imagens de radar com resolução de 30 x 30 metros;
- (iii) no mapeamento dos cursos d'água, emprega-se o receptor GNSS em campo;
- (iv) a área de preservação permanente (APP) é delimitada a partir do mapeamento de campo com o receptor GNSS;
- (v) o planejamento dos pátios é elaborado em função da localização das árvores e do volume autorizado para corte;
- (vi) as estradas são construídas considerando-se a topografia, por áreas mais acessíveis e distantes da APP;
- (vii) a locação de pátios é calculada de acordo com a distância ótima entre pátios, e varia conforme a floresta;

(viii) na execução do plano de manejo, as operações de abertura de estrada e pátio, derrubada e arraste de árvores são monitoradas com receptor GNSS;

(ix) as ações colocadas em prática no campo são consistentes com as tarefas planejadas no escritório; e

(x) geralmente, na instalação da infraestrutura, providencia-se um espaço aberto e com dimensões inferiores às das áreas utilizadas anteriormente nos lançamento sistemático da rede de estradas e infra-estrutura de pátio de estocagem (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007; FIGUEIREDO; CUNHA, 2007; FIGUEIREDO et al., 2009; PAPA; FIGUEIREDO, 2011).

Atualmente, em todos os estados da região norte, o uso das técnicas de manejo florestal de precisão já está disseminado, porém a adoção vem se dando de forma parcial. De modo complementar, o conhecimento a respeito dos métodos é amplamente divulgado por meio dos editais para a concessão de florestas públicas, os quais mencionam os seus benefícios no quesito referente à inovação tecnológica (BRASIL, 2015). Recentemente, novos sensores e equipamentos, como o *Light detection and ranging* (Lidar) e as Aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), foram testados em diversas atividades do manejo florestal na Amazônia e já são implementados no aperfeiçoamento das técnicas de monitoramento e manejo florestal de precisão em florestas tropicais (D'OLIVEIRA; FIGUEIREDO; PAPA, 2014; D'OLIVEIRA et al., 2012; FIGUEIREDO, 2014; FIGUEIREDO; PAPA; D' OLIVEIRA, 2015; LOCKS; AMARAL, 2015; LOCKS, C. J, 2017).

Com a finalidade de diferenciar as principais formas de intervenção e gerenciamento dos recursos florestais da Amazônia, são apresentadas suas terminologias e conceitos, conforme se encontra descrita no Quadro 1, a seguir.

Quadro 1. Terminologias relacionadas ao tema manejo florestal adotado por instituições, pesquisadores e legislação (Adaptado de BRASIL, 2006; BRAZ et al., 2007; FIGUEIREDO; CUNHA, 2007; FSC, 2018, ITTO, 2018; SABOGAL et al., 2000; WWF, 2018).

TERMINOLOGIA	CARACTERÍSTICAS
Exploração florestal	Colheita de produtos florestais.
Extrativismo florestal	Primeira forma de exploração econômica dos recursos naturais da floresta, com limite da capacidade de oferta, mão de obra local e baixo nível tecnológico.
Exploração convencional	Exploração sem planejamento, de baixo rendimento e alto impacto sobre vegetação remanescente, uso de funcionários não qualificados, falta de equipamentos e máquinas apropriados e extremamente degradante para a floresta.
Exploração planejada ou Exploração de Impacto Reduzido	Operações de extração intensiva de madeira implementadas de forma planejada, controlada e com cuidados para minimizar o impacto ambiental na paisagem florestal. Adota o inventário pré-corte, planejamento da infraestrutura de forma a minimizar os danos no solo e cursos d'água, técnicas apropriadas de corte para reduzir desperdício e avaliação pós-colheita.
Manejo Florestal	Exploração de impacto reduzido que prevê atividades de pós-colheita, como tratamentos silviculturais para estimular o desenvolvimento da floresta e medidas para a proteção da área.
Manejo de Precisão de Florestas Naturais	Planejamento florestal que considera a heterogeneidade da floresta na otimização das intervenções, com uso do sensoriamento remoto, sistema de posicionamento por satélite e sistema de informações geográficas.
Modelo Digital de Exploração Florestal - Modeflora®	Processo de planejamento florestal que consiste em georreferenciar e "geomonitorar" todos os processos, da elaboração a execução do manejo florestal. Projetos de manejo adaptados à variabilidade da paisagem florestal, com menor impacto ambiental e maior rendimento das atividades operacionais.
Manejo Florestal Sustentável	Manejo florestal que prevê atividades que garantam a manutenção dos serviços ambientais, econômicos e sociais da floresta para as gerações futuras.
Plano de Manejo Florestal Sustentável	Conjunto de documentos, que descrevem os métodos e técnicas de uso de uma área de floresta, submetidos ao órgão ambiental para avaliação conforme a legislação vigente.
Manejo Certificado	Conjunto de princípios e critérios estabelecidos por instituição certificadora que assegura a qualidade ambiental, social e econômica do manejo florestal e sua cadeia produtiva.
Manejo Precaucional	Exploração madeireira implementada em áreas de PFIs (Paisagens florestais intactas) sem comprometer a área mínima de conservação (500 Km ²) e com área de impacto controlada.
Concessão Florestal	Modalidade de gestão de florestas públicas que permite que a União, estados e municípios concedam a uma pessoa jurídica o direito de manejar, de forma sustentável, as florestas de domínio público para obtenção de produtos e serviços.

2.3. Etapas do Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS)

De acordo com o novo Código Florestal, o manejo sustentável é definido como

[...] a administração da vegetação natural 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 ou não, de múltiplos produtos e subprodutos da flora, bem como a utilização de outros bens e serviços (BRASIL, 2012).

Na Amazônia Legal, o manejo florestal sustentável é a principal alternativa de uso da área de reserva legal em propriedades rurais. Sua exploração depende do licenciamento do órgão ambiental competente, e requer o Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), um instrumento de planejamento estratégico de longo prazo para a produção sustentada da matéria-prima para a indústria florestal (SABOGAL et al., 2000).

De forma simplificada, pode-se descrever o plano de manejo florestal como um processo composto de atividades pré-exploratórias, exploratórias e pós-exploratórias (SABOGAL et al., 2000) executadas em escalas de macro e microplanejamento (BALIEIRO et al., 2010) de modo a manter a capacidade produtiva da floresta e perpetuá-la como tal (SABOGAL et al., 2009).

As atividades pré-exploratórias são aquelas responsáveis pelo levantamento de informações sobre a área a ser manejada e, por isso, são fundamentais para auxiliar na tomada de decisão e assegurar a qualidade do projeto. Já a etapa exploratória é a execução do plano propriamente dito, onde se realizam atividades de abertura de estradas e pátio, corte das árvores, arraste das toras e transporte da matéria-prima até a indústria. Após a exploração são realizadas atividades de avaliação do projeto, ações de proteção da área e manutenção da infraestrutura permanente (IFT, 2014; HOLMES et al., 2002; SABOGAL et al., 2000).

A implementação dessas atividades acontece em dois níveis diferentes dentro do processo de manejo florestal (Figura 2): Macroplanejamento - a nível de propriedade; e microplanejamento - a nível de unidade de produção (BALIEIRO et al., 2010):

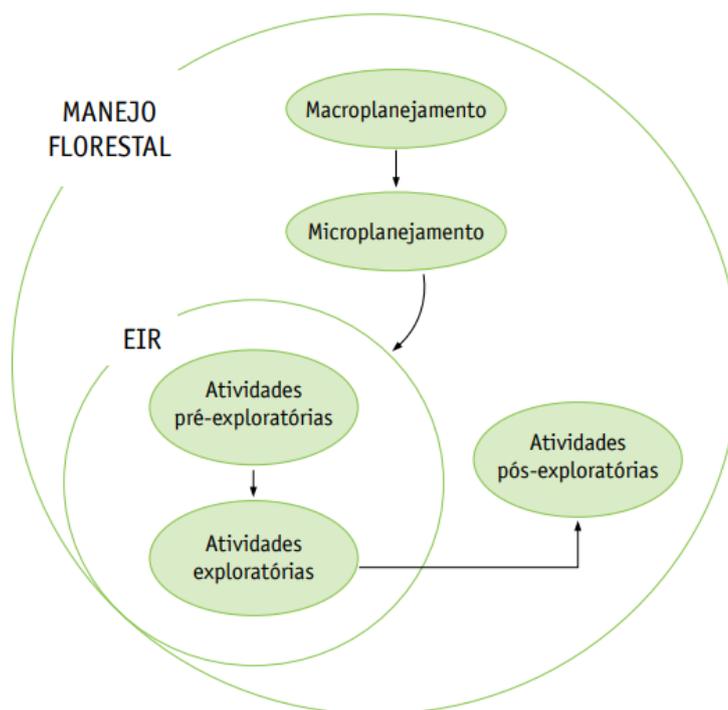


Figura 2. Etapas do manejo florestal (BALIEIRO et al., 2010).

2.3.1. Macroplanejamento

Um plano de manejo florestal pode ser feito em propriedades particulares, projetos de assentamento e em unidades de conservação, como, por exemplo, as reservas extrativistas e as florestas nacionais (BRASIL, 2006). Seja qual for o imóvel, o primeiro estágio do macroplanejamento consiste em caracterizá-lo quanto a sua localização geográfica, formas de ocupação e uso da terra, além de descrever o meio físico e biológico em que ele se encontra (BRAZ et al., 2007).

Atualmente, pelo novo Código Florestal, o zoneamento de uma propriedade se dá pelo Cadastro Ambiental Rural (CAR) – registro público obrigatório para todo imóvel rural em território nacional. Nele são definidas, em uma propriedade, as áreas consolidadas para a produção agropecuária, bem como a Área de Preservação Permanente (APP), de uso restrito, e área de Reserva Legal (RL), que contém remanescentes de vegetação nativa (BRASIL, 2012). O manejo florestal é feito, normalmente, na área de reserva legal de uma propriedade, pois é onde existe floresta primária com potencial de aproveitamento. Além disso, áreas de floresta que não

sejam APP nem RL, passíveis de desmatamento e conversão em outros usos, também podem ser manejadas, caso tenha viabilidade econômica.

O segundo estágio do macroplanejamento acontece dentro da RL, onde são definidas a AMF – Área de Manejo Florestal (AMF), a RA – Reserva Absoluta e as UMFs (Unidades de Produção Anual) (Figura 3).

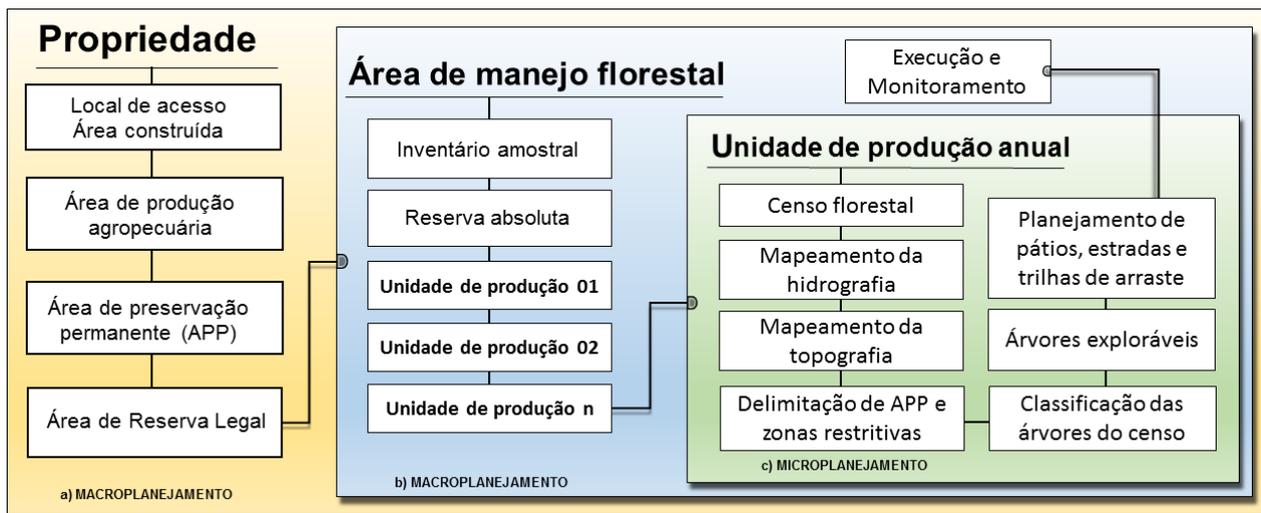


Figura 3. Atividades do manejo florestal divididas entre macro e microplanejamento.

A AMF consiste na área que será efetivamente explorada em um ou mais ciclos de corte. A reserva absoluta é uma área de no mínimo 5% do total da AMF, conservada para fins de monitoramento, que representa o ecossistema florestal que será manejado na AMF. As UPAs são sub-divisões da AMF destinadas para exploração em um ano. (BRASIL, 2006).

O inventário amostral, denominado também como inventário diagnóstico, é uma atividade pré-exploratória que tem como objetivo estimar o potencial produtivo da AMF. Essa estimativa somada às informações sobre a necessidade de consumo da indústria, disponibilidade de insumos e recursos para realizar as operações florestais são determinantes para definir a quantidade e tamanho das UPAs dentro da AMF (SABOGAL et al., 2009). O inventário diagnóstico é feito por meio de parcelas amostrais distribuídas na área de manejo, onde são coletadas informações de espécie e circunferência das árvores com DAP ≥ 10 cm. O tamanho da parcela varia de 0,25, 0,5 e 1 hectare (SILVA, et al., 2005) e o número de parcelas deve ser suficiente para atingir um erro de amostragem relativo de no máximo 10% (BRASIL, 2007).

O período de tempo, em anos, entre sucessivas colheitas em uma mesma UPA é denominado ciclo de corte (BRASIL, 2006), sendo este compatível com a capacidade produtiva da floresta (BRAZ et al., 2007). Os ciclos de corte na Amazônia variam entre 25 e 35 anos para planos de manejo que preveem o uso de máquinas no arraste de toras (PMFS Pleno), e 10 anos para aqueles sem uso de máquinas no arraste, como por exemplo, arraste por tração animal (PMFS de Baixa Intensidade). Isto significa que uma vez feito o manejo madeireiro em uma UPA, ela só poderá ser novamente explorada após o período estabelecido no ciclo de corte.

2.3.2. Microplanejamento

Uma vez definida a UPA a ser explorada, iniciam-se as atividades pré-exploratórias de microplanejamento que tem como objetivo caracterizar detalhadamente a vegetação, topografia e hidrografia da área que será explorada (Figura 3). A descrição da paisagem florestal, juntamente com a proposta de planejamento da infra-estrutura de exploração e a produção esperada da UPA devem ser apresentados em um documento chamado Plano Operacional Anual (POA) (BRASIL, 2006).

O levantamento da vegetação dentro da UPA é do tipo censitário, denominado também como inventário 100%. Nele, todas as árvores com diâmetro maior que o limite mínimo de corte, que é de 50 cm à 1,30 metro de altura do solo ($DAP \geq 50\text{cm}$), são mapeadas, identificadas e medidas. A legislação determina também que o censo florestal contemple todos os indivíduos arbóreos com um limite de DAP de, no mínimo, 10 cm menor do que o diâmetro de corte. Essa informação é importante para prever o volume disponível para o próximo ciclo de corte da UPA.

O mapeamento detalhado da estrutura física da paisagem florestal da UPA é denominado microzoneamento. A topografia do terreno e a rede de cursos d'água e nascentes são as principais componentes desse mapeamento. As informações geradas no microzoneamento são muito importantes para a etapa seguinte, de classificação de árvores e planejamento da exploração, pois é a partir do microzoneamento que as áreas de preservação permanente são definidas, como também as áreas de maior sensibilidade ambiental e acesso restrito pela declividade do terreno (FIGUEIREDO, 2007c).

Outro critério fundamental que regula a quantidade de árvores que podem ser cortadas é a intensidade de exploração. Em PMFS Plenos, a intensidade de corte não pode ser maior que $30 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ e para planos de manejo de baixa intensidade, $10 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. Essa regulação da produção florestal está fundamentada no crescimento médio volumétrico das espécies comerciais na Amazônia, que é de $0,865 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ por ano (BRASIL, 2006). O equilíbrio entre a intensidade de corte e o tempo necessário para o reestabelecimento do volume extraído da é essencial para garantir a produção florestal contínua ao longo dos ciclos de corte (IFT, 2014).

2.3.3. O futuro do manejo florestal na Amazônia

Diante de tantas particularidades para elaboração de um plano de manejo florestal na Amazônia, ainda é comum a visão de que o plano de manejo é um documento puramente burocrático com intuito de solicitar autorização para explorar a floresta, sem preocupação com a perpetuação do ecossistema florestal ao longo do tempo. O PMFS é um documento base que determina técnicas de utilização do recurso florestal apoiadas nas características, potencialidade e capacidade de resiliência da paisagem florestal, porém, pode ser usado para encobrir fraudes e crimes ambientais. Um exemplo disso é a prática de “esquentar” madeira, que consiste em gerar documentos de autorização para corte de árvores que, verdadeiramente, não existem e vender como crédito para legalizar a extração de árvores sem autorização para corte. Este artifício ilegal pode ser feito de diversas formas: (i) superestimativa de variáveis medidas em campo durante o inventário, como diâmetro e altura comercial, para inflar o volume de espécies nobres; (ii) indentificação equivocada de indivíduos sem valor comercial, classificados como espécies de alto valor comercial e; (iii) inclusão de árvores no inventário censitário que não existem na floresta (árvores imaginárias) (BRANCALION, et al., 2018).

Ainda são muitos os desafios para se atingir a sustentabilidade da atividade de manejo florestal na Amazônia, dentre eles:

- 1) identificação botânica das espécies;
- 2) inventário diagnóstico de grandes áreas com baixo erro amostral;
- 3) definição de ciclo de corte por taxa variável conforme grupo de espécies ou tipo de floresta;

- 4) planejamento da infraestrutura de exploração conforme variáveis ambientais da paisagem florestal;
- 5) monitoramento amplo dos impactos causados pela exploração;
- 6) fiscalização efetiva durante o processo de licenciamento dos PMFS;
- 7) regularização fundiária e ocupação irregular de áreas de manejo recém colhidas;
- 8) falta de recursos humanos e sucateamento dos órgãos de fiscalização e controle de projetos de manejo florestal, principalmente na esfera estadual;
- 9) desatualização da legislação ambiental diante dos avanços da tecnologia;
- 10) incompatibilidade da base de dados geográficos entre diferentes órgãos e legislação vigente;
- 11) visão de curto prazo e de ganho rápido em projetos de manejo florestal na Amazônia.

Dentre tantos desafios e dificuldades de se elaborar um plano de manejo com qualidade na Amazônia, é preciso buscar soluções que aumentem a capacidade de monitoramento dos órgãos de controle do estado, bem como a acurácia das informações de campo que subsidiem a elaboração de projetos mais adaptados à realidade florestal por parte dos técnicos e empresários do setor. Neste sentido, o avanço da geotecnologia tem proporcionado novas formas de se monitorar e coletar dados de campo, com alta acurácia e precisão, riqueza de detalhes, menor tempo e em grande escala. Um exemplo disso é a tecnologia Lidar (*Light Detection and Ranging*) que pode ajudar a solucionar alguns dos problemas citados anteriormente e proporcionar uma nova forma de se manejar os recursos florestais na Amazônia.

2.4. Levantamento a laser aerotransportado

2.4.1. Funcionamento da telemetria a laser

O Lidar (*Light Detection and Ranging*) é um sistema de sensoriamento remoto ativo de escaneamento a laser (LEFSKY et al., 2002) que emite radiação eletromagnética a um dado comprimento de onda e sob uma alta taxa de frequência de repetição, o que lhe confere a capacidade de detectar o gradiente de altura e

profundidade de um determinado objeto ou superfície-alvo escaneado (JUNTIILA et al., 2013; LEFSKY et al., 2002; VASTARANTA et al., 2012; WULDER et al., 2013).

O princípio básico da telemetria a laser se dá pelas propriedades da luz, que tem velocidade conhecida (299.792.458 m/s) e constante. A partir da medição precisa do intervalo de tempo entre o pulso emitido pelo Laser (Figura 4; A) e o seu retorno após ser refletido pelo alvo (Figura 4; B), é possível obter a distância entre os dois (A e B) (SHAN; TOTH, 2018).

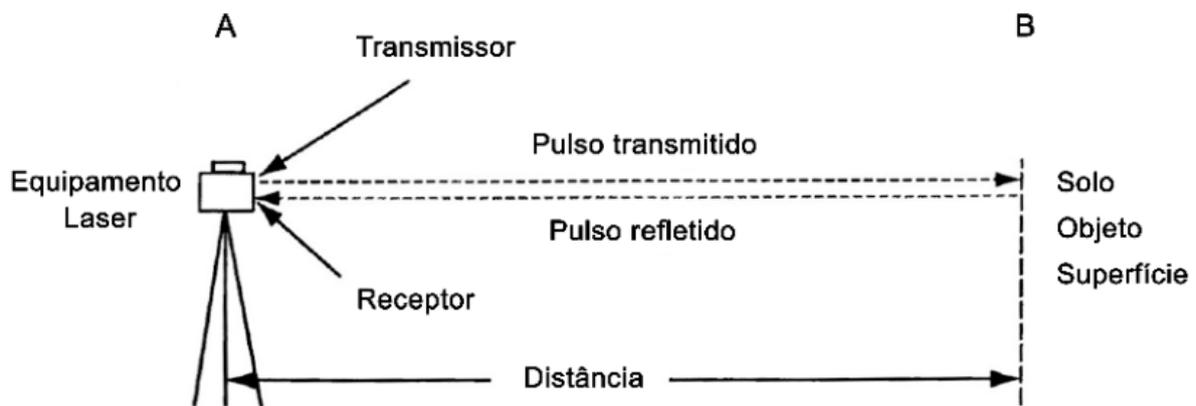


Figura 4. Funcionamento da telemetria a laser (PETRIE, TOTH, 2018).

No sistema de escaneamento com Lidar embarcado em uma aeronave (ALS - *Aerial Laser Scanning*) (Figura 5), o cálculo da distância é feito entre a aeronave e a superfície sobrevoada, tendo como resultado a elevação altimétrica em solo.

$$Elevação = Alt - \left(c * \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (1)$$

Em que:

Δt : diferença de tempo entre a emissão e recepção do pulso laser;

Alt: altura em que a aeronave se encontra a cada instante do voo;

c: velocidade da luz (299.792.458 m/s).

2.4.2. Sobrevoos Lidar em áreas de floresta

O uso do ALS em áreas de floresta tem como principais características a cobertura de grandes extensões de terra, acurácia em levantamento planialtimétrico, alta densidade amostral, capacidade de penetrar na vegetação, sensibilidade a

pequenas variações na superfície, e grande quantidade de informações em intervalos curtos de tempo (PAPA et al., 2017).

Para o funcionamento do ALS são necessários o sistema de navegação global por satélite integrado à unidade de movimento inercial (GNSS/IMU), sistema de navegação inercial (INS) e a unidade de emissão e recebimento do pulso laser (Figura 5).

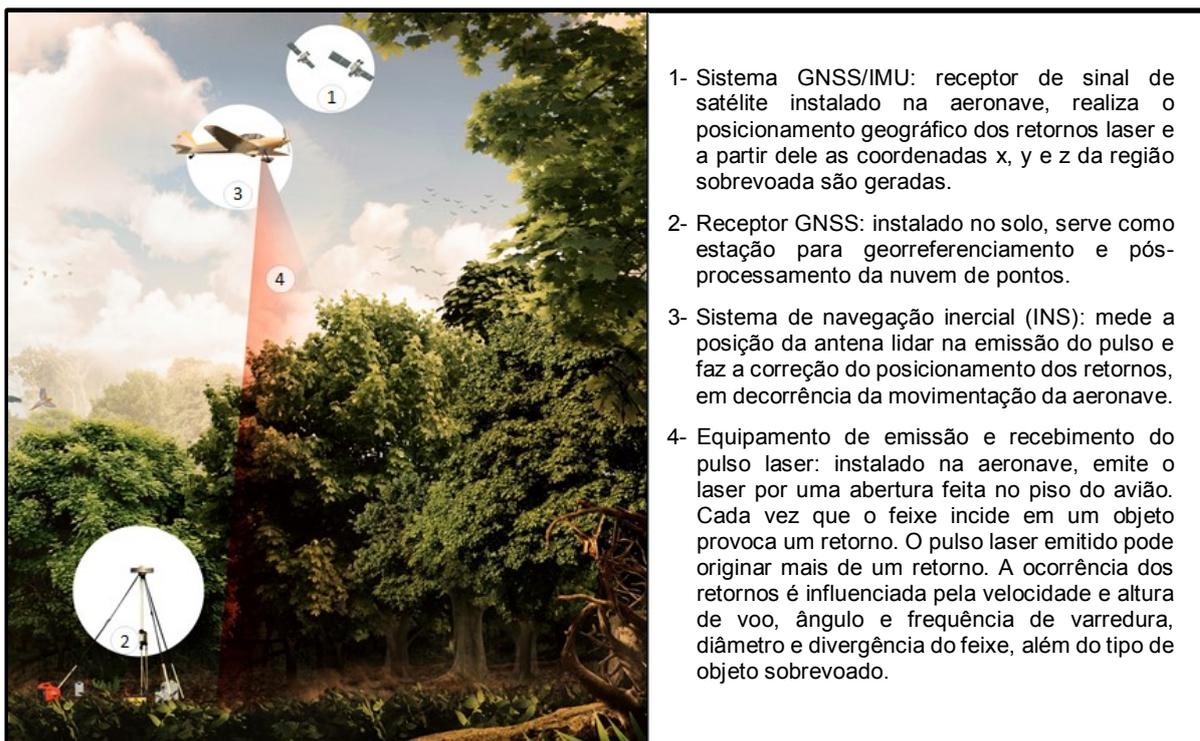


Figura 5. Ilustração sobre o funcionamento e equipamentos usados no escaneamento a laser aerotransportado – ALS (*Aerial Laser Scanning*) (PAPA, et al., 2017).

Como resultado, o sobrevoo Lidar gera um conjunto de dados no formato LAS, arquivo binário de formato aberto, que contém os registros do voo referente aos sensores GPS, IMU e distâncias do pulso laser (ASPRS, 2011). O processamento combinado dessas informações em softwares específicos gera dados de pontos, georreferenciados nos eixos x, y e z. A distribuição desses em um dado espaço é comumente chamado de nuvem de pontos.

Em uma paisagem florestal, a nuvem de pontos é composta pela posição tridimensional de objetos como folhas, galhos, troncos, serapilheira, solo (BLASCHKE; TIEDE; HEURICH, 2004) e até pássaros atingidos pelo feixe de luz.

Um único feixe laser pode gerar múltiplos pontos de retorno em diferentes alturas, sendo que o primeiro deles (*first return*), normalmente, reflete a parte superior

do dossel da floresta, e os demais se distribuem ao longo do eixo vertical da vegetação em direção ao solo (*last return*), indicando a máxima penetração do sinal na vegetação (DETTO et al., 2015; WULDER et al., 2012) (Figura 6).

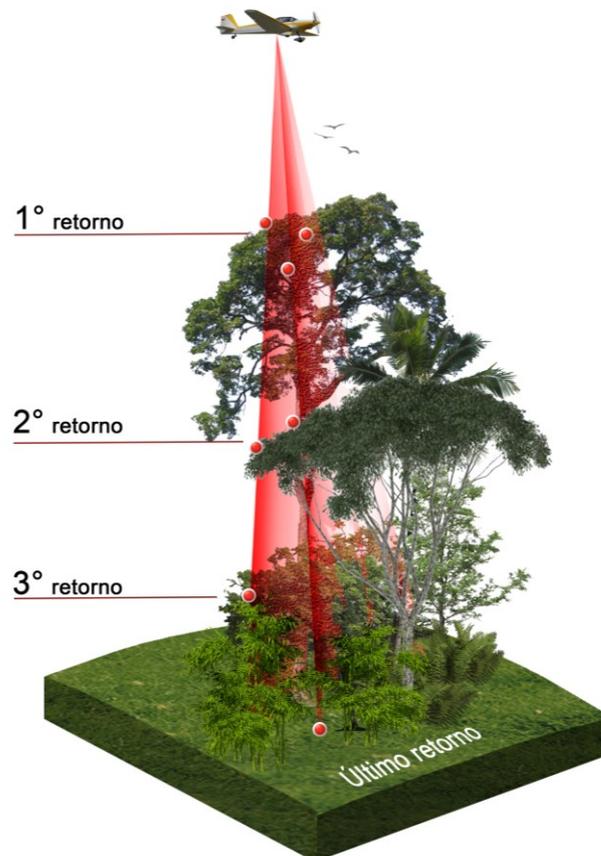


Figura 6. Pontos de retorno da vegetação sobrevoada com Lidar aerotransportado.

Em locais com a vegetação muito fechada e homogênea, há maior quantidade de primeiros retornos devido a pouca penetrabilidade do laser a nível do solo. Já em paisagens florestais mais heterogêneas, com vegetação em diferentes alturas, tamanho e forma de copa variados, abertura de dossel e alta biodiversidade da vegetação, o pulso laser tende a gerar múltiplos retornos (DRAKE et al., 2002b).

Além da localização geográfica x , y e z , cada ponto tem consigo também o registro da intensidade do sinal, número do retorno, número de retornos do pulso, classificação, ângulo de varredura, número de identificação e hora (ASPRS, 2011). A classificação representa o tipo de superfície do objeto a partir do qual o retorno foi refletido. Essa classificação normalmente é fornecida pela empresa responsável pelo aerolevantamento, ou pode ser feita utilizando algoritmos de programas estatísticos gratuitos (MCGAUGHEY, 2010; R CORE TEAM, 2018). A nomenclatura das classes

é padronizada internacionalmente, sendo 2 o valor daqueles pontos classificados como solo (ASPRS, 2011).

A seleção de um sub-conjunto de pontos com características específicas, como uma mesma classe ou a mesma ordem de retorno, permite a obtenção de modelos digitais de elevação específicos da paisagem florestal (SHAN; TOTH, 2018). Dois modelos de elevação merecem destaque: Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital do Terreno (MDT) (Figura 7).

O MDS é produzido com o ponto mais alto (*first* return) de cada pulso laser, e representa em áreas de floresta, a superfície do topo do dossel da floresta (SHAN; TOTH, 2018). Já o MDT é feito a partir dos retornos que atingiram o solo (classe 2) e representa a elevação da superfície do terreno desnudo (SHAN; TOTH, 2018). Ambos os modelos têm como atributo principal a altitude em relação ao nível do mar (cota altimétrica).

Tanto o MDS como o MDT são, em geral, construídos com técnicas de interpolação pelo vizinho mais próximo (ROUSSEL; AUTY, 2018). A interpolação é um método de inferência espacial que estima valores baseado em pontos amostrais por meio do ajuste de funções matemáticas locais em uma grade regular 2D ou 3D (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Para a modelagem do terreno, esse processo é muito importante, já que a distribuição dos pontos que atingem o solo é irregular, podendo ser amplamente espaçada em locais onde a cobertura florestal é muito densa (SHAN; TOTH, 2018).

Para produzir bons modelos de superfície é muito importante que seja realizada a retirada de pontos espúrios, tanto aqueles maiores que a altura máxima da floresta, quanto abaixo do nível do solo (Figura 7a). Ao final do processo de modelagem, são gerados arquivos de imagem (TIF) que podem ser usados para extração de informações relevantes para a análise da paisagem florestal (HYYPÄ, et al., 2018).

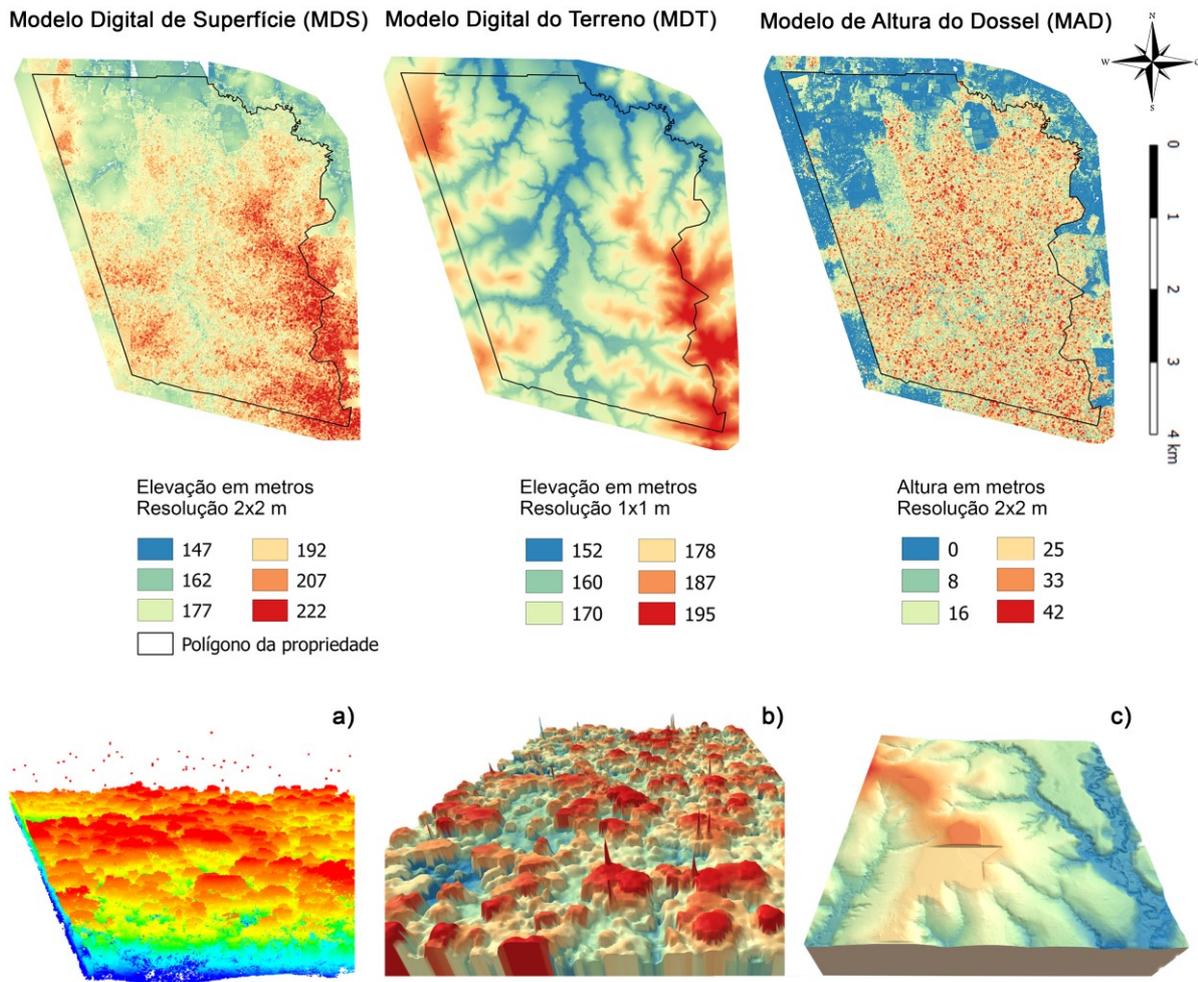


Figura 7. Modelo digital de superfície (MDS), Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo de Altura do Dossel (MAD) da Unidade Demonstrativa de Manejo Florestal de Precisão da Embrapa, em Rio Branco, AC. (a) nuvem de pontos Lidar com presença de ruído ; (b) modelo digital da superfície com erro gerado pela presença de pontos espúrios; (c) modelo digital do terreno com falha no processo de interpolação.

A normalização do MDS é um processamento extremamente importante que aumenta as possibilidades de uso dos dados do Lidar, pois permite que o atributo elevação, distância vertical de uma coordenada em relação ao nível do mar, de cada retorno seja transformado em altura (z). O processo de normalização pode ser feito pela diferença do MDS pelo MDT, que resulta no Modelo de Altura do Dossel (MAD) ou pela diferença do atributo de elevação de cada retorno em relação ao MDT, que produz a nuvem de dados LAS normalizada (SHAN; TOTH, 2018).

2.4.3. Aplicação do ALS no manejo de florestas nativas

Os sensores ativos têm como diferencial a capacidade de captar informação referente a terceira dimensão do espaço, sendo tal atributo de extrema importância na representação da paisagem florestal e de processos ecológicos, que se passam em um espaço multidimensional (LEFSKY et al., 2002; NIJLAND et al., 2015). Assim a altimetria a laser passa a captar, tridimensionalmente, aspectos estruturais da floresta (Figura 8), com os quais faz-se a correlação com aspectos ecológicos observados em campo.

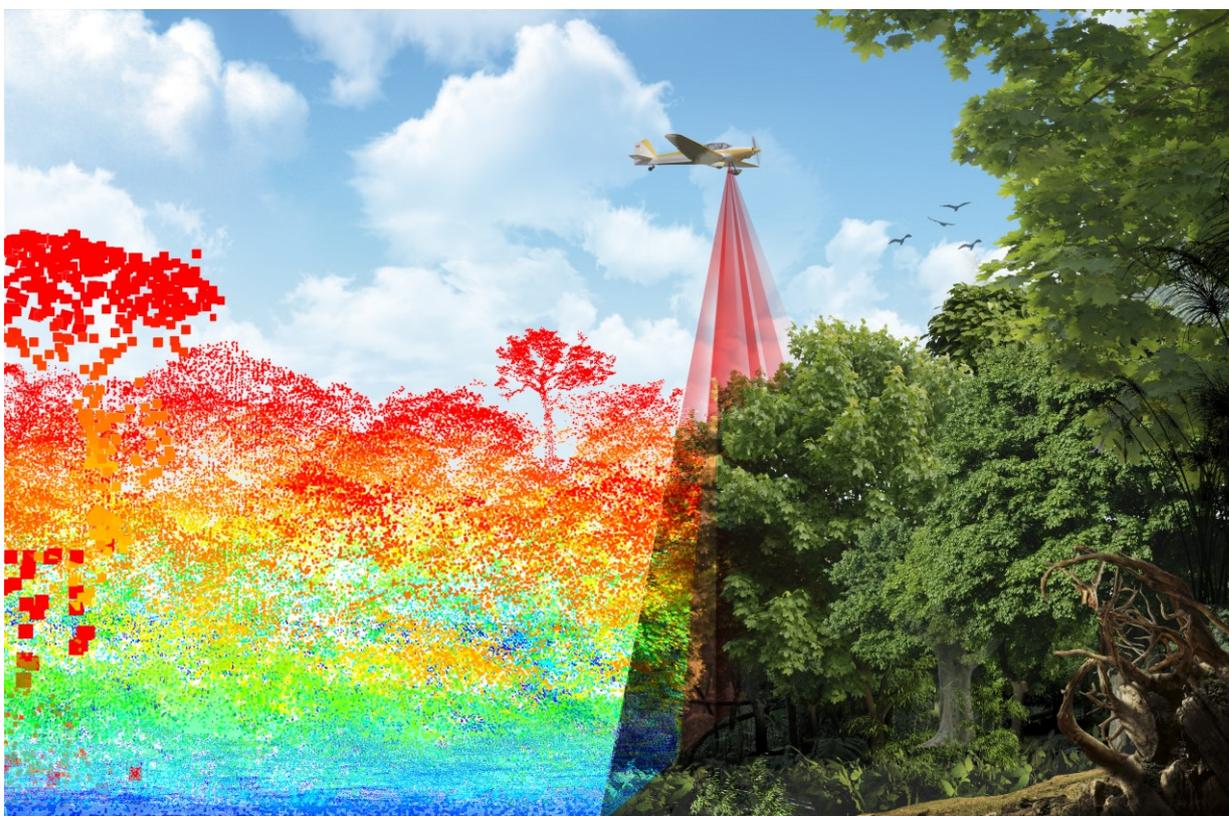


Figura 8. Tridimensionalização da floresta com uso de Lidar aerotransportado.

A análise da nuvem de pontos normalizada baseia-se, principalmente, em estatísticas de distribuição da altura dos retornos acima do solo (VÉGA et al., 2016), que dá origem as métricas de altura.

A escolha das métricas está diretamente ligada aos objetivos da análise que pretende-se fazer na área. A seguir serão apresentados alguns exemplos do uso de métricas Lidar aplicada ao manejo e monitoramento de florestas nativas.

2.4.3.1. Métrica de intensidade

A intensidade (i) é uma variável registrada pelo Lidar ainda pouco utilizada quando comparada com a variável altura. Isso porque ela é fortemente afetada pela potência do equipamento laser, ângulo de incidência, reflectância do alvo e condições atmosféricas, sendo necessário calibrar essa variável para que seja possível realizar estudos de comparação entre diferentes varreduras, voos e regiões (GARCÍA et al., 2010).

Estudos em que a intensidade foi usada combinada com outras métricas de elevação mostram que a intensidade melhorou as estimativas de parâmetros florestais como a biomassa e a identificação de árvores individuais (GARCÍA et al., 2010; HOLMGREN; PERSSON; SÖDERMAN, 2008; SILVA et al., 2016).

D' Oliveira e Silva (2017), por exemplo, identificaram o fenômeno *blowdown* utilizando-se da variável intensidade obtida com Lidar em uma área de floresta tropical primária no Acre (Figura 9). A descoberta foi associada ao padrão de queda das árvores, do centro para as bordas, causado pelos fortes ventos descendentes comuns e imprevisíveis nas regiões central e ocidental da Amazônia (Figura 10).

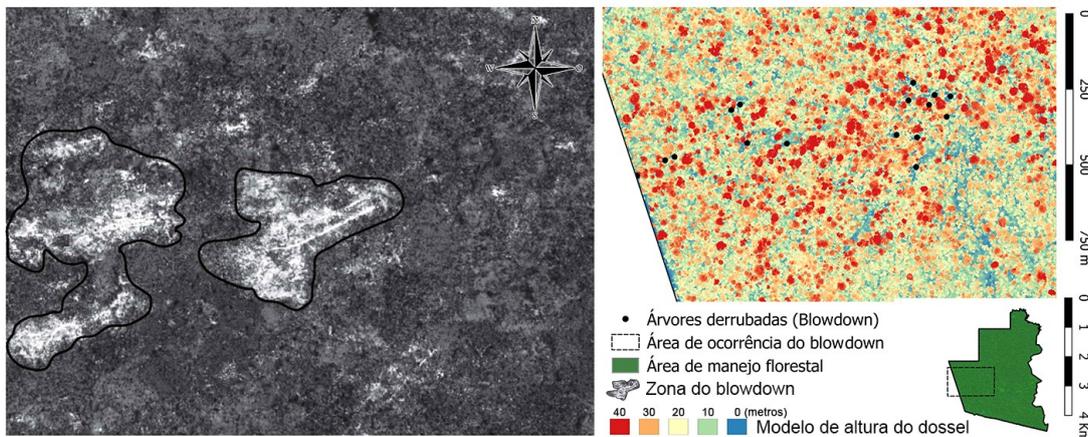


Figura 9. Análise da variável Lidar de intensidade de luz refletida (fonte: D'OLIVEIRA; SILVA, 2017).

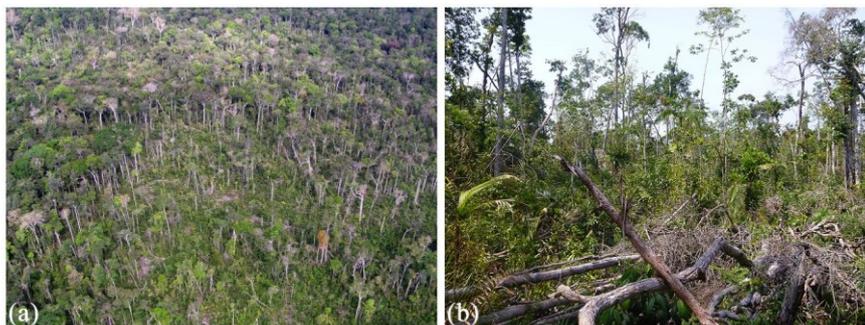


Figura 10. Vista aérea (a) e de solo (b), em 2007, de uma área de ocorrência de *blowdown* e, em 2005, no estado do Amazonas, região central da Amazônia (MARRA, 2016).

2.4.3.2. Métricas de altura

As métricas de altura têm seu uso bem consolidado na área florestal pois a distribuição vertical dos retornos está diretamente relacionada com a distribuição vertical da vegetação sobrevoada (MAGNUSSEN, S.; BOUDEWYN, P., 1998).

Lefsky et al. (2005) sugerem três categorias para as métricas de altura: medidas de posição, dispersão e densidade, com as quais são realizados grande parte dos estudos para estimativa dos parâmetros ecológicos e estruturais da vegetação florestal relevantes para o manejo florestal (D'OLIVEIRA et al., 2012; JUNTILLA et al., 2013; LEFSKY et al., 1999; LEFSKY et al., 2002; TORRESAN et al., 2016; VASTARANTA, 2012; WULDER et al., 2013).

2.4.3.2.1. Medidas de posição

A média da altura dos retornos Lidar é uma medida de tendência central que representa o centro do perfil vertical da altura da floresta (Figura 11) (MASCARO, et al., 2011). Existem outras medidas de posição comumente usadas no processamento da nuvem normalizada, como valores de máximo, mínimo, mediana, moda, quartis e intervalo interquartil (LEFSKY et al., 2002; NIJLAND et al., 2015).

As medidas de posição, são de fácil obtenção e comumente usadas por apresentar alta correlação com parâmetros estruturais da vegetação (TORRESAN et al., 2016). A altura média do dossel é uma medida de tendência central da parte superior da floresta, que representa a média dos valores de altura máxima em uma determinada área ou célula (*grid*) (Tabela 01).

Estudos mostram que em florestas tropicais a média da altura do dossel explica melhor a estrutura da vegetação do que a simples média da altura dos pontos em todo eixo vertical da vegetação (DRAKE, et al, 2002; SHAN; TOTH, 2018). Isso porque, em florestas tropicais, o dossel superior da floresta é ocupado por árvores que exercem dominância sobre o restante da vegetação arbórea, pois apresentam maiores valores de altura, tamanho de copa e diâmetro de fuste. Por isso, a análise de retornos nessa faixa de altura é uma boa estratégia para predição de parâmetros estruturais em florestas tropicais.

Tabela 1. Métricas de altura de dados Lidar em quatro parcelas de 1 hectare localizados em uma área de floresta umbrófila primária no estado do Acre. Cada uma das parcelas representa um padrão distinto de estrutura da vegetação: (a) parcela com predominância de dossel aberto, presença de clareiras, árvores isoladas e ocorrência de espécies como bambu e cipós no estrato inferior da estrutura vertical; (b) parcela com clareiras em estágio de regeneração e presença de árvores jovens; (c) parcela com presença de árvores dominantes e co-dominantes, mas ainda com pequenas aberturas entre as copas; (d) parcela com predominância de dossel fechado, ausência de clareiras e sub-bosque ralo.

Parcela (1 hectare)		a	b	c	d
Dados de campo	Área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	7,05	9,60	13,63	15,56
	Biomassa ($Mg \cdot ha^{-1}$)	94016,2	144915,7	212189,2	202956,5
	Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	91,81	125,08	177,45	202,50
	Abundância (número de indivíduos $\cdot ha^{-1}$) com DAP ≥ 40 cm	28	33	44	49
Métricas do Lidar	Altura média dos pts (m)	13,72	14,32	16,91	22,01
	Assimetria da altura média dos pts	0,20	0,24	-0,09	-0,63
	Curtose da altura média dos pts	2,24	2,08	2,05	2,78
	Altura máxima (m)	41,66	41,00	38,25	42,33
	Média da altura do dossel (m)	18,98	21,90	23,83	28,47
	P10 (m)	1,04	0,33	1,23	5,82
	P50 (m)	14,46	14,35	17,92	23,11
	P90 (m)	25,69	28,39	30,68	33,79
	Abertura do dossel a 15 metros (%)	29%	21%	13%	2%
	Abertura do dossel a 25 metros (%)	79%	62%	55%	29%
	Índice de área foliar ($m^2 \cdot m^2$)	4,19	3,84	4,81	5,84
	Índice de área foliar do sub-bosque (%)	35%	35%	26%	17%
	Total de retornos	115695	137356	135846	126207

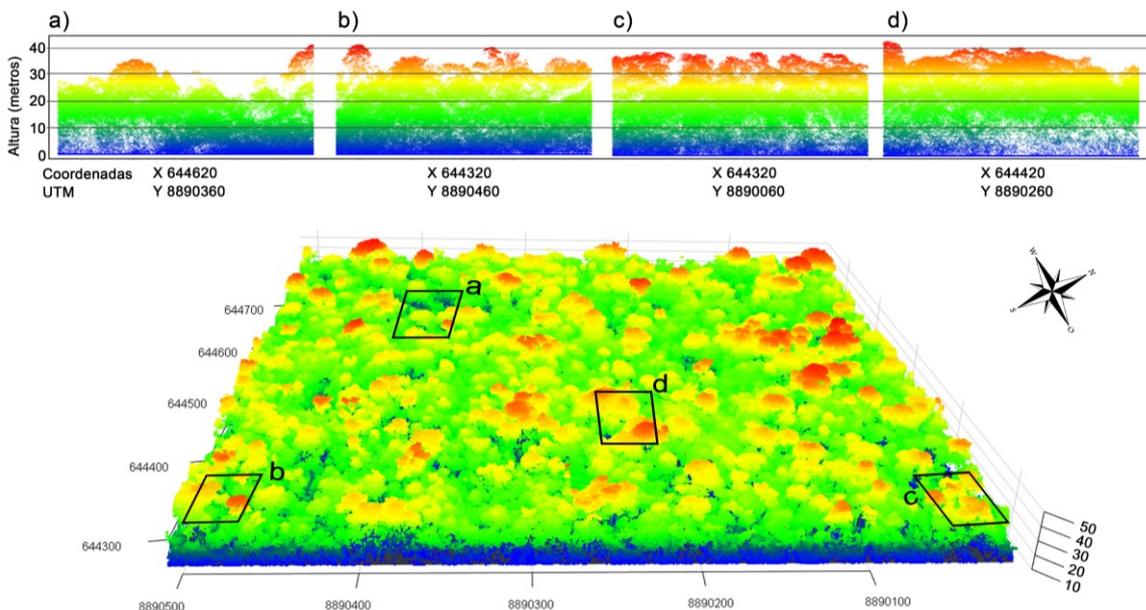


Figura 11. Análise de métricas de altura em uma área de floresta umbrófila primária no estado do Acre. (a) parcela com predominância de dossel aberto, presença de clareiras, árvores isoladas e ocorrência de espécies como bambu e cipós no estrato inferior da estrutura vertical; (b) parcela com clareiras em estágio de regeneração e presença de árvores jovens; (c) parcela com presença de árvores dominantes e co-dominantes, mas ainda com pequenas aberturas entre as copas; (d) parcela com predominância de dossel fechado, ausência de clareiras e sub-bosque ralo.

2.4.3.2.2. Medidas de dispersão

As métricas de dispersão têm como principal característica representar a distribuição dos pontos ao longo do eixo vertical da área sobrevoada (SHAN; TOTH, 2018) e podem ser descritas pelo conjunto de medidas de posição expressas em valores percentis ou absolutos.

O percentil é uma estatística descritiva amplamente utilizada para expressar características estruturais da vegetação sobrevoada (LEFSKY, et al., 1999). O cálculo dos percentis consiste em dividir o conjunto de dados em cem (100) partes ordenadas com uma porcentagem da dados, aproximadamente, igual em cada uma delas.

Na análise de dados LiDAR, o percentil reflete em que posição os pontos estão em relação à distribuição normal do conjunto de dados. A mediana, por exemplo, é o percentil 50º, pois divide os dados em duas partes iguais, 50% abaixo e 50% acima da mediana. A altura (z) de um determinado percentil é chamada de quantil. Na parcela d, por exemplo (Figura 11), o quantil do percentil 90 é igual a 33,8 metros. Isso significa que 90% das observações da parcela estão abaixo de 33,8 metros e 10% acima desse quantil (Tabela 3 e Figura 11d).

O perfil de retorno é outra forma de analisar a dispersão dos retornos ao longo do eixo vertical da floresta (Figura 12). A amplitude desse perfil está relacionada com o volume e densidade da vegetação florestal localizada a uma dada altura (SOBERÓN; PETERSON, 2005) (Figura 12a, b, c, d).

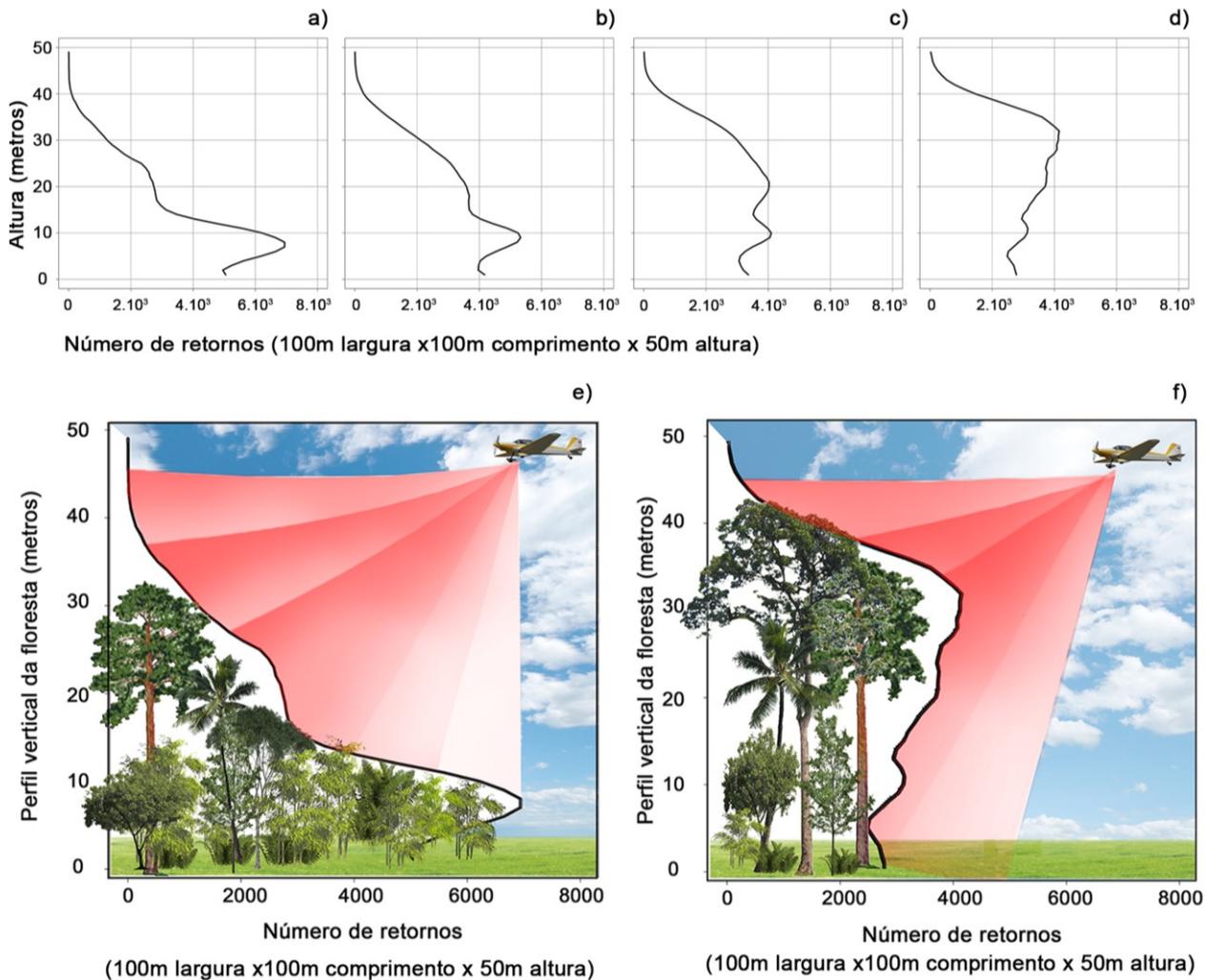


Figura 12. Perfil vertical da vegetação em florestas tropicais com difentes padrões estruturais e ecológicos. Quantidade média de retorno em ((a) parcela com predominância de dossel aberto, presença de clareiras, árvores isoladas e ocorrência de espécies como bambu e cipós no estrato inferior da estrutura vertical; (b) parcela com clareiras em estágio de regeneração e presença de árvores jovens; (c) parcela com presença de árvores dominantes e co-dominantes, mas ainda com pequenas aberturas entre as copas; (d) parcela com predominância de dossel fechado, ausência de clareiras e sub-bosque ralo; (e) ilustração do número de retornos em uma vegetação com árvore isolada e abertura de dossel; (f) ilustração do número de retornos em área de floresta alta com dossel fechado.

2.4.3.2.3. Medidas de densidade

De forma simplificada, podemos entender as métricas de densidade como índices resultantes do produto da transformação das demais métricas (posição e dispersão) a partir de operações matemáticas feitas entre elas (SHAN; TOTH, 2018). O principal objetivo desse artifício matemático é padronizar a variável de interesse para evidenciar alguma informação desejável (MANLY, 2008).

Na área florestal existe uma infinidade de índices desenvolvidos, exclusivamente, para um tipo de estudo ou área, descobertos muitas vezes pelo exercício da tentativa e erro. Foi o que fizeram D' Oliveira et al. (2012) quando testaram a padronização de diferentes estratos de altura com a quantidade total de retornos dentro e abaixo dos limites estabelecidos pelos pesquisadores. O resultado desse processo foi o índice Modelo de Densidade Relativa (MDR) (Figura 13a).

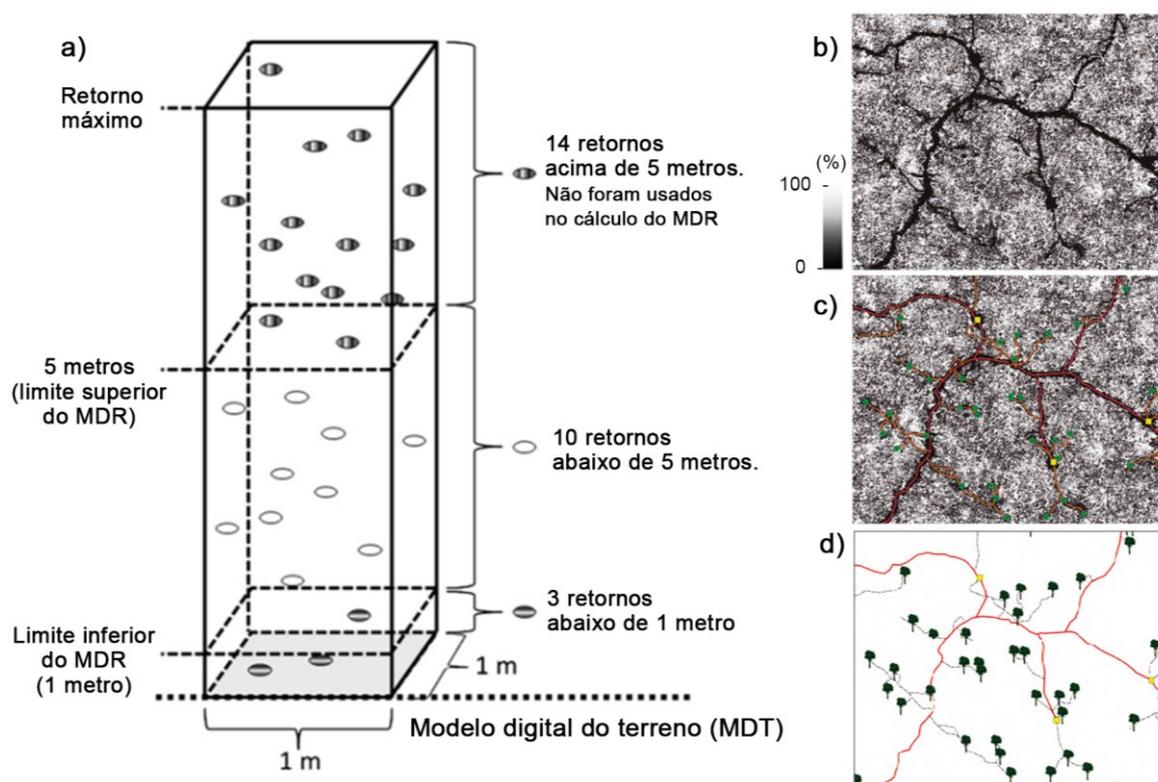


Figura 13. (a) Ilustração do método de cálculo do modelo de densidade relativa. O valor do MDR é percentual e varia de 0 a 100%. Valores próximos de 80% indicam vegetação do sub-bosque com pouca ou nenhuma perturbação na faixa de 1-5 metros acima do solo. Valores próximos de zero (0%) significa que o sub-bosque foi removido pelas atividades do manejo florestal. Isso acontece quando a divisão o número de retornos acima ou abaixo da na faixa de 1 – 5 m é dividido por zero; (b) imagem do MDR; (c) vetorização da infraestrutura de estrada, pátios, trilhas de arraste e clareira; (d) mapa da infraestrutura após a exploração florestal (adaptado de D' OLIVEIRA et al., 2012 e D'OLIVEIRA; FIGUEIREDO; PAPA, 2014).

O MDR varia de 0 a 100% e foi desenvolvido para evidenciar a perda de vegetação florestal após a execução do manejo madeireiro (Figura 13b). As áreas com valores de MDR próximas de zero são consideradas áreas impactadas pela infraestrutura de pátios, estradas, trilhas de arraste e clareiras das árvores exploradas (Figura 13c, d).

2.5. Unidade demonstrativa de manejo florestal de precisão

As mudanças no processo de elaboração de planos de manejo a partir de técnicas de precisão acontecem desde as atividades pré-exploratórias no nível do macroplanejamento, e chegam ao monitoramento pós-exploratório da área manejada. (BRAZ; et a., 2007). A seguir serão apresentadas como as geotecnologias vem modificando a forma de se fazer manejo florestal na Amazônia, com enfoque no uso de dados do Lidar em atividades pré-exploratórias de planejamento. Para isso foi utilizado uma base de dados da Unidade Demonstrativa do Manejo Florestal de Precisão localizada no campo experimental da Embrapa Acre.

Este tópico se detém na apresentação das transformações proporcionadas pelas geotecnologias ao manejo florestal na Amazônia, com a utilização da base de dados da Unidade Demonstrativa do Manejo Florestal de Precisão, no campo experimental da Embrapa Acre, para realização de atividades de planejamento pré-exploratórias.

Ressalta-se que, no manejo florestal de precisão, é fundamental ter domínio de conhecimentos básicos sobre sistema de informações geográficas, sensoriamento remoto e GPS (CAVALCANTE, 2007; FIGUEIREDO, 2007a). Trata-se de uma metodologia passível de erro, principalmente no que diz respeito à manipulação de dados geográficos por diferentes *softwares* e coletadores de dados. A pesquisa é ilustrada com exemplos implementados no sistema de coordenadas UTM, datum WGS 84 e fuso 19L.

2.5.1. Macroplanejamento da propriedade

O objeto do estudo é uma propriedade situada no município de Rio Branco, estado do Acre, na BR 364, km 14, e com área total de, aproximadamente, 1200 hectares, sendo 220 ha destinados à implantação de atividades de pesquisa agropecuária, 20 ha de rede de estradas e instalações da sede da fazenda e 960 ha averbados como reserva legal, onde foi delimitada uma área de manejo florestal de 810 hectares (Figura 14a). A área antropizada somou 240 hectares.

2.5.2. Inventário florestal diagnóstico

A locação das parcelas amostrais pode ser feita de forma aleatória, sistemática ou estratificada (Figura 14b) e a quantidade de parcelas deve ser suficiente para atingir o erro amostral mínimo de 10% relativo às estimativas populacionais da AMF (BRASIL, 2006).

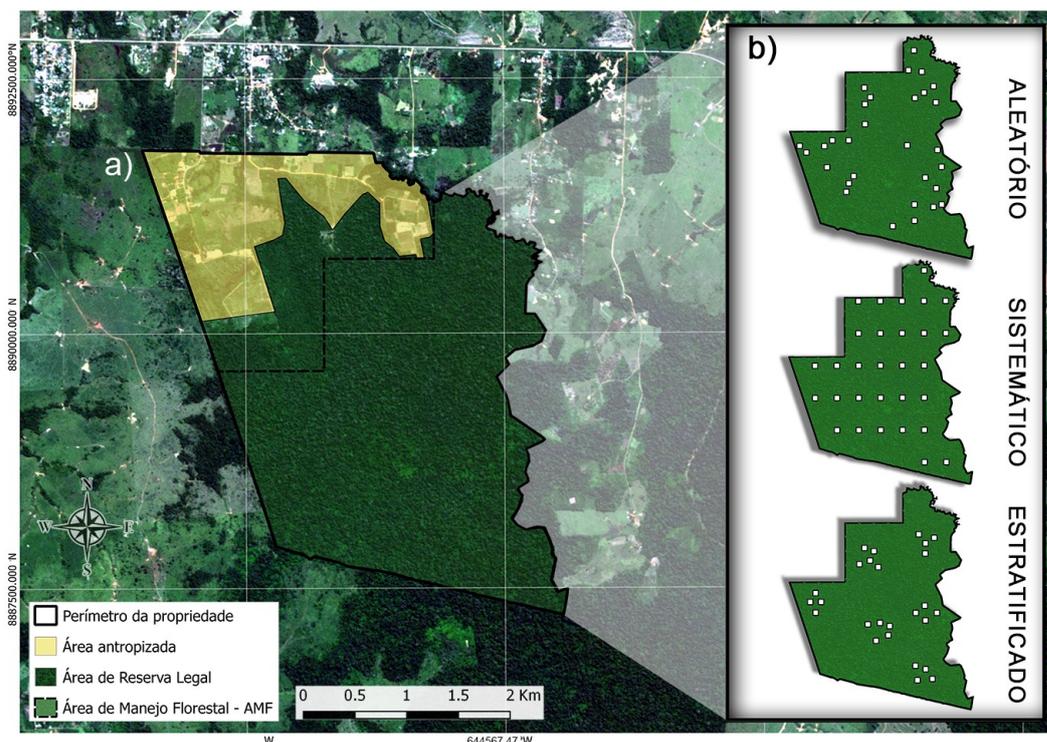


Figura 14. (a) Macroplanejamento da propriedade para fins de manejo florestal e; (b) instalação de parcelas em três tipos de amostragem diferentes.

Realizar um inventário diagnóstico que capte a variabilidade da vegetação em grandes áreas de floresta é um desafio, principalmente na região amazônica (LU et al., 2003). Uma quantidade de amostras insuficientes ou a má distribuição destas pela área de manejo (AMF) podem afetar significativamente a qualidade das estimativas populacionais de uma variável de interesse (JUNTTILA et al., 2013; MOERMAN; ESTABROOK, 2006), como por exemplo, o volume comercial de uma floresta submetida a licitação para concessão florestal.

Uma das formas de se reconhecer, de antemão, as tipologias da vegetação de uma área a ser manejada é por meio do sensoriamento remoto. As imagens de satélite, por exemplo, são boas indicadoras para diferenciar uso e ocupação do solo (IBGE, 2012), bem como na caracterização de florestas homogêneas e jovens

(DRAKE et al., 2002b; LEFSKY et al., 2002). Já em florestas primárias e heterogêneas, como a floresta amazônica, os sensores passivos não são sensíveis às variações estruturais presentes na vegetação (MCROBERTS; CHEN; WALTERS, 2017; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012; TURNER et al., 1999).

O Lidar, por se tratar de um sensor ativo de precisão centimétrica, é capaz de captar pequenas variações em todo perfil vertical da vegetação (LEFSKY et al., 2002), desde a superfície do dossel até o solo (Figura 15), sendo assim, uma fonte confiável para o planejamento amostral do inventário diagnóstico estratificado.

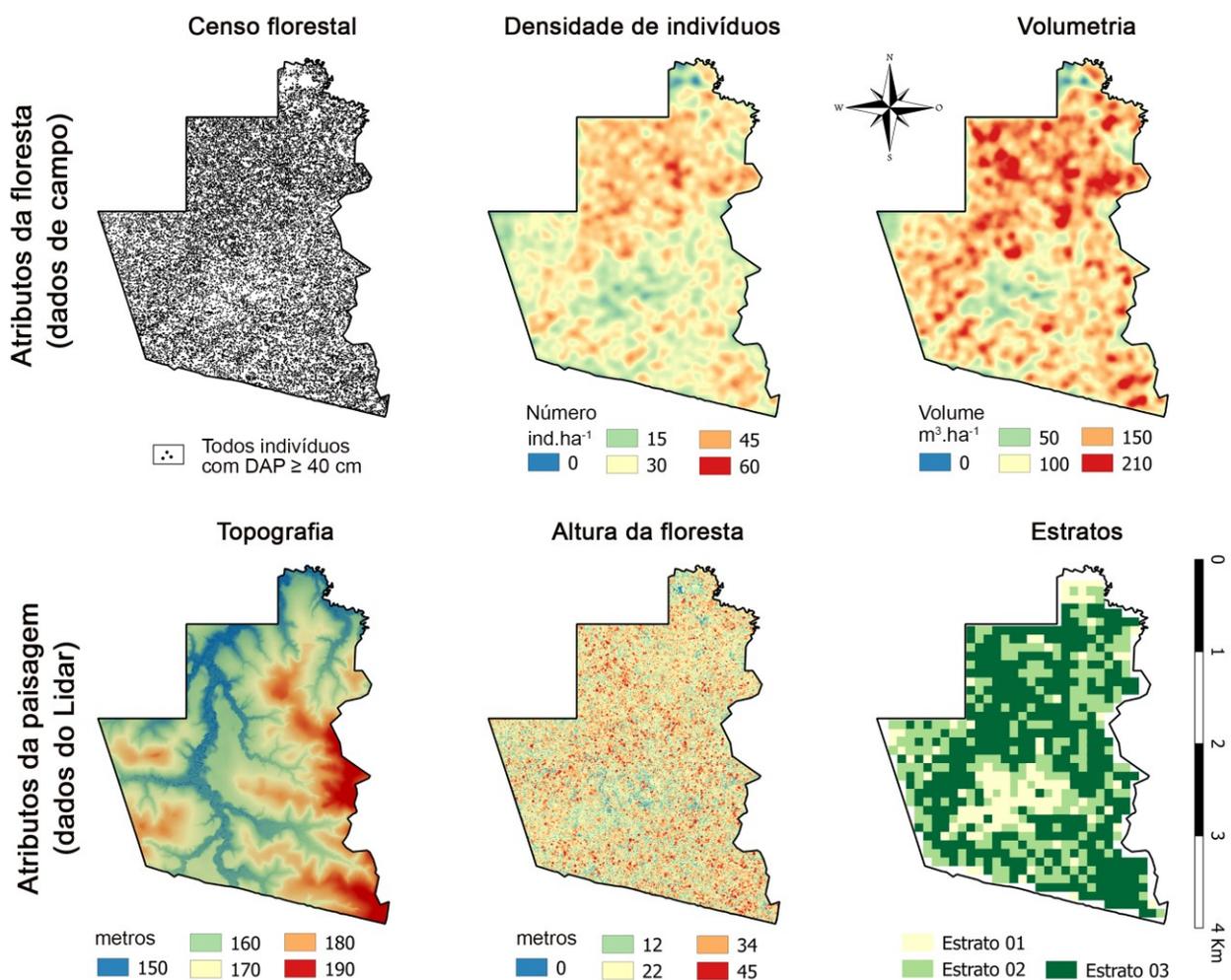


Figura 15. Comparação entre dados coletados em campo (Censo florestal, Densidade de indivíduos e Volumetria) e com Lidar (Topografia do terreno, Altura da floresta e Estratificação).

A identificação de padrões da paisagem florestal (Figura 15) com dados Lidar possibilita a realização do inventário florestal estratificado, que melhora as estimativas populacionais em virtude da menor variação da estrutura florestal dentro dos estratos, comparado a população total.

2.5.3. Macroplanejamento da Área de Manejo Florestal (AMF)

Exemplos teóricos de planejamento costumam dividir uma AMF em 25 a 35 unidades de produção anual, conforme o ciclo de corte estabelecido no PMFS. Entretanto, na prática, casos como esse são minoria e só acontecem em grandes extensões de terra, como em Florestas Nacionais, sob regime de concessão a empresas exclusivas de manejo florestal na Amazônia. Por outro lado, um procedimento muito comum e pouco descrito na literatura é a implantação de uma UPA única, assim denominada pelo fato de se ajustar a AMF e a unidade de produção dentro das mesmas dimensões (Figura 16a). Isso acontece principalmente em propriedades de porte pequeno e médio.

Após a definição sobre o número aproximado de UPAs em uma Área de Manejo Florestal (AMF), pode-se delimitar essas áreas de forma sistemática (Figura 16b), utilizando-se um plano cartesiano, ou baseando-se no conceito do manejo florestal de precisão (Figura 16c). Neste segundo caso, as UPAs são separadas de maneira que as divisões naturais da área, como os rios, igarapés e a topografia do terreno, sejam respeitadas.

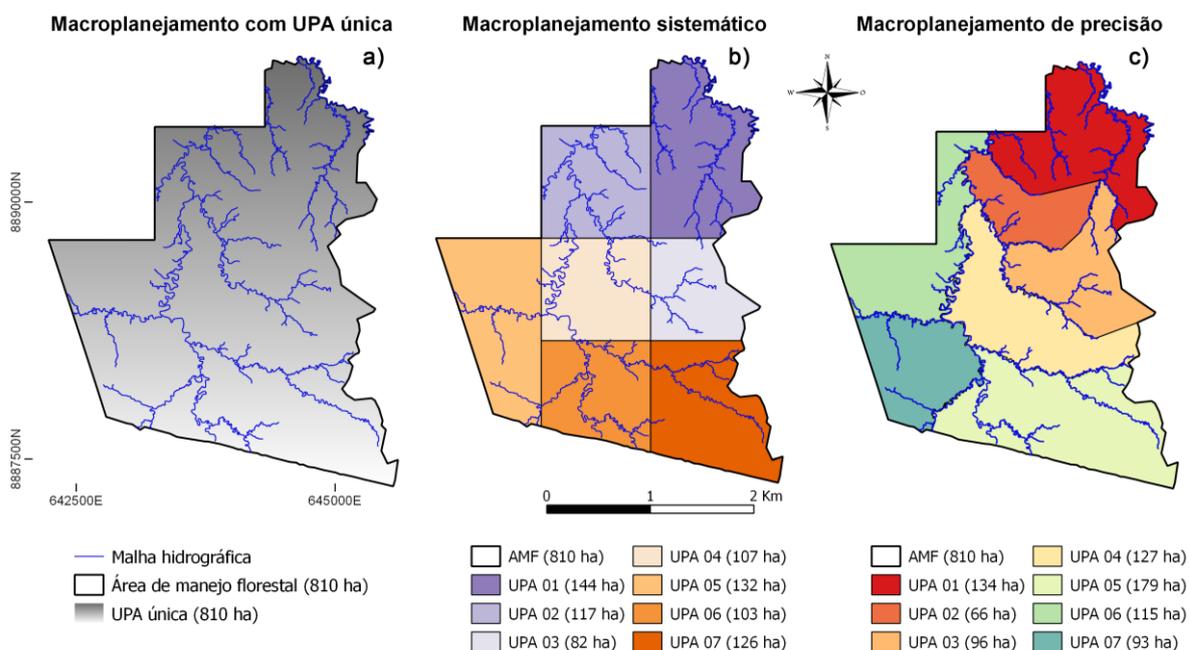


Figura 16. Modelos de macroplanejamento da(s) Unidade(s) de Produção Anual(is) para elaboração de Plano de Manejo Florestal Sustentável. (a) UPA única; (b) UPAs definidas a partir de plano cartesiano; (c) UPAs definidas a partir das características topográficas e hidrográficas da AMF.

Essa estratégia de macroplanejamento da AMF reduz a quantidade de pontes, otimiza a rede de estradas principais e secundárias, gera menor impacto em áreas de APP e tende a proporcionar maior rendimento operacional (BRAZ; et al., 2007; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

2.5.4. Inventário florestal censitário

O inventário florestal censitário é uma atividade vinculada ao microplanejamento da UPA, podendo ser feito, preferencialmente, até dois anos antes da sua exploração (Figura 17a) (BRASIL, 2006).

No mapeamento são coletadas informações de circunferência do fuste, altura comercial, espécie florística, qualidade da madeira, número de identificação da placa e localização geográfica de cada indivíduo. A partir dessas informações, são definidas as classes de exploração das árvores mapeadas:

- a) Corte futuro: todos os indivíduos com $DAP \leq 50$ cm;
- b) Porta sementes: 10% dos indivíduos aptos para exploração, por espécie;
- c) Raras: espécies de baixa ocorrência na UPA (0,03 ou 0,04 indivíduos.ha⁻¹ conforme a espécie);
- d) Proibidas: espécies como castanheira, seringueira, pau-rosa, dentre outras estabelecidas pelas legislações federal e estadual;
- e) APP: todos os indivíduos localizados dentro da área de preservação permanente de rios, igarapés, nascentes e com relevo de declividade maior que 45 graus.
- f) Exploráveis: indivíduos com $DAP \geq 50$ cm, fora da área de APP, de espécies autorizadas para corte e bom potencial de aproveitamento do fuste. A soma do volume dos indivíduos exploráveis não pode ultrapassar a intensidade de corte estabelecida no PMFS;
- g) Remanescentes ou corte futuro: todos aqueles indivíduos que atendem aos critérios da classe exploráveis, porém não serão cortados em função do baixo interesse comercial da espécie ou limite da intensidade de corte;

A técnica de mapeamento das árvores sofreu uma grande transformação com o uso do receptor GNSS adotado no manejo florestal de precisão comparado ao método análogo (FIGUEIREDO; CUNHA, 2007). Enquanto no método análogo as

árvores são mapeadas em um plano cartesiano de distâncias X e Y, medidas com trena (REIS, et al., 2013), no método digital o mapeamento é feito pelo sistema de posicionamento global por satélites (Figura 17b) (FIGUEIREDO; CUNHA, 2007). Atualmente os receptores de navegação (código C/A) já acessam duas constelações de satélites: o sistema norte americano (GPS) com 31 satélites e o russo (Glonass) com 26, o que confere uma estabilidade do sinal independente da hora do dia. Os procedimentos e índices técnicos para uso do receptor GNSS no inventário florestal estão bem descritos em Figueiredo e Cunha (2007).

Novas tecnologias como o Lidar já são testadas para o inventário das árvores, utilizando-se, principalmente, as informações de copa (Figura 17c) (HYYPÄ, et al., 2018). Esse método é conhecido como segmentação de copas e sua eficiência foi demonstrada em florestas temperadas e com baixa diversidade (YU et al., 2011). Em florestas tropicais, os algoritmos de detecção evoluem rapidamente, tornando possível a correta identificação de copas grandes, porém têm utilidade limitada quando se almejam estudos ecológicos mais elaborados (FERRAZ, et al., 2016). O uso combinado do Lidar com imagens multi e hiperspectrais tem sido um dos caminhos para melhorar a metodologia de segmentação de árvores individuais em florestas heterogêneas (BALDECK et al., 2014; HOLMGREN; PERSSON; SÖDERMAN, 2008; SMITS et al., 2012)

O uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) no mapeamento de florestas permite a identificação e a localização de espécies a partir do período de floração (GARZON-LOPEZ, et al., 2002; KLOSTERMAN; RICHARDSON, 2017). Essa metodologia de inventário deve ser realizada durante o período de um ano (calendário fenológico de inventário), pois as análises são baseadas na variação da cor da copa das árvores durante as estações do ano. Os primeiros testes realizados na área demonstrativa da Embrapa apresentam resultados promissores, pois já é possível identificar, remotamente, uma dezena de espécies (Figura 17d). O método consiste em classificar imagens georreferenciadas (ortofotos) de alta resolução, obtidas com ARPs, através de algoritmos semiautomáticos e *softwares* específicos (LOWE, 2004).

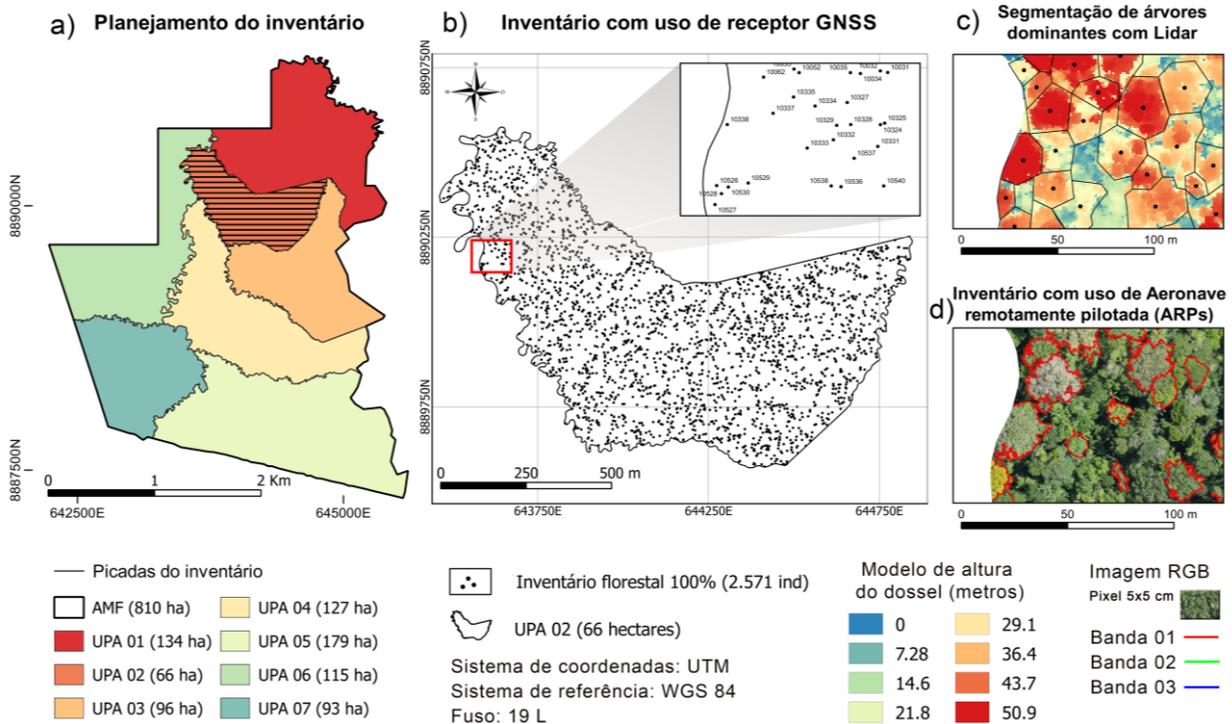


Figura 17. Inventário florestal censitário em uma unidade de produção anual (UPA) para elaboração de Plano Operacional Anual (POA) em um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). (a) Seleção da UPA 02 para elaboração do Plano Operacional Anual (POA); (b) censo florestal na UPA 02; (c) demonstração de inventário florestal com uso de segmentação automática a partir de dados de altimetria a laser; (d) demonstração de inventário florestal com segmentação automática a partir de ortofoto obtida com ARPs (Aeronave remotamente pilotadas).

2.5.5. Microzoneamento da Unidade de Produção Anual

As atividades de microzoneamento da paisagem florestal foram muito favorecidas pela evolução da geotecnologia, pois os procedimentos analógicos para mapear a declividade do terreno e o traçado dos rios e igarapés, já podem ser substituídos quase por completo com o advento do sensoriamento remoto. No manejo florestal de precisão, utilizam-se imagens de radar, satélite, Lidar e ARPs com alta confiabilidade e acurácia para obter informações com maior precisão e em menos tempo, a um custo menor, com maior confiabilidade e em grandes extensões de terra.

2.5.5.1. Microzoneamento do Terreno

O microzoneamento do terreno é feito a partir da cota altimétrica de imagens de radar. Atualmente a missão espacial SRTM é a principal fonte de informação para essa etapa de mapeamento que se destina aos projetos de manejo na Amazônia

(FIGUEIREDO, 2007c). As imagens SRTM são gratuitas e estão disponíveis em duas resoluções espaciais: 90 x 90 metros e 30 x 30 metros (USGS, 2018). É importante lembrar que a imagem de radar SRTM capta a variação da elevação da superfície da Terra e não exatamente do terreno (solo).

Existem outras fontes de dados altimétricos que podem ser usadas para mapeamento da topografia, como, por exemplo, as imagens do satélite SENTINEL-1, ASTER e a cota altimétrica obtida pelo do barômetro dos receptores GNSS (Figura 18a) durante o censo florestal.

O uso do escaneamento a laser aerotransportado – ALS (*Aerial laser scanning*) para modelagem do terreno foi a primeira e principal aplicação do Lidar em projetos florestais (LEFSKY et al., 2002). Os sensores mais antigos captavam apenas o primeiro e o último retorno, obtendo-se assim a variação da superfície da floresta e do terreno, respectivamente.

Atualmente, os sensores são mais potentes e conseguem captar todo perfil vertical da vegetação, acessando desde a copa até os níveis inferiores da floresta como o solo (LEFSKY et al., 2002). A partir dos pontos que atingiram o solo é possível fazer a modelagem digital do terreno (MDT) por meio de técnicas de interpolação (ROUSSEL; AUTY, 2018) e assim, obter uma imagem de alta resolução espacial que representa a variação topográfica da paisagem florestal com altíssima precisão. O MDT depende diretamente da densidade de pontos que atingiram o solo. Em geral, são feitos com resolução de 1 m² (Figura 18b) (D' OLIVEIRA; FIGUEIREDO; PAPA, 2014).

Alguns estudos com ARPs já conseguem gerar modelos do terreno a partir de nuvens de pontos extremamente densas, com auxílio de pontos de controle no solo (LOWE, 2004) e uso de sensores ativos embarcados.

Seja qual for a fonte digital dos dados para elaborar o microzoneamento do terreno, em todas elas o resultado final é uma imagem que representa valores de cota de altura. A partir dessa imagem é possível extrair curvas de nível, mapas de declividade, modelo de drenagem e representações tridimensionais do terreno que auxiliam no planejamento da infra-estrutura de exploração (Figura 18c, d, e, f)

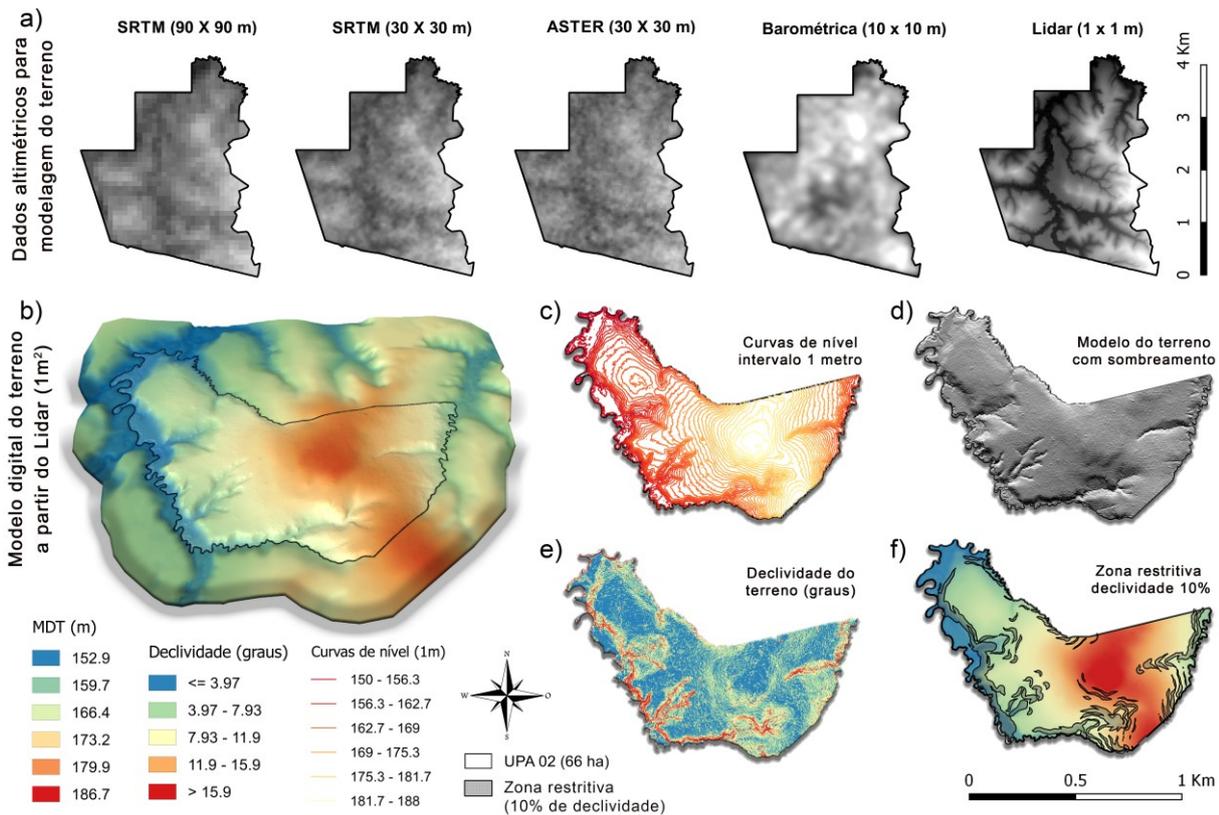


Figura 18. (a) Microzoneamento do terreno com uso de diferentes fontes de dados altimétricos. (b) modelo digital do terreno com resolução de 1 m²; (c) curvas de nível; (d) modelo do terreno com efeito de sombreado; (e) mapa de declividade; (f) mapa de zona restritiva (10%).

2.5.5.2. Microzoneamento da hidrografia

No microzoneamento da hidrografia faz-se o mapeamento dos cursos d'água e nascentes, com emprego de técnicas e equipamentos de precisão, e nestes se inclui o receptor GNSS (FIGUEIREDO, 2007b). Este é um trabalho que requer cuidados no momento da implementação em campo, e em face dessa exigência, recomenda-se que seja feito em equipe ou em dupla (Figura 19a). Dessa forma, é possível caminhar em áreas de difícil acesso, nas margens dos rios, nas partes internas dos igarapés e beiras dos barrancos, pela necessidade de mapear, com a maior riqueza possível de detalhes, todas as ramificações da rede de drenagem existentes em uma UPA (FIGUEIREDO et al., 2009).

Essas informações são fundamentais para a delimitação das áreas de preservação permanentes (APPs) com alta precisão, a fim de assegurar a proteção e classificação das árvores localizadas dentro dessa faixa sem que sejam cortadas (Figura 19c). Estudos indicam que 98,7% das árvores existentes no interior da APP

são eficientemente mapeadas, justamente pelo rigor obtido com o uso da tecnologia do microzoneamento com receptor GNSS para a delimitação das mesmas (FIGUEIREDO et al., 2009).

É comum se encontrar microzoneamento da hidrografia de unidades de produção feito a partir da base cartográfica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o município, ou gerados pela modelagem de imagens de radar como o SRTM (FIGUEIREDO, 2007b). Esses dados são confiáveis, mas pouco precisos e não são capazes de captar as pequenas e médias variações que acontecem na forma dos rios e igarapés (Figura 19a, b).

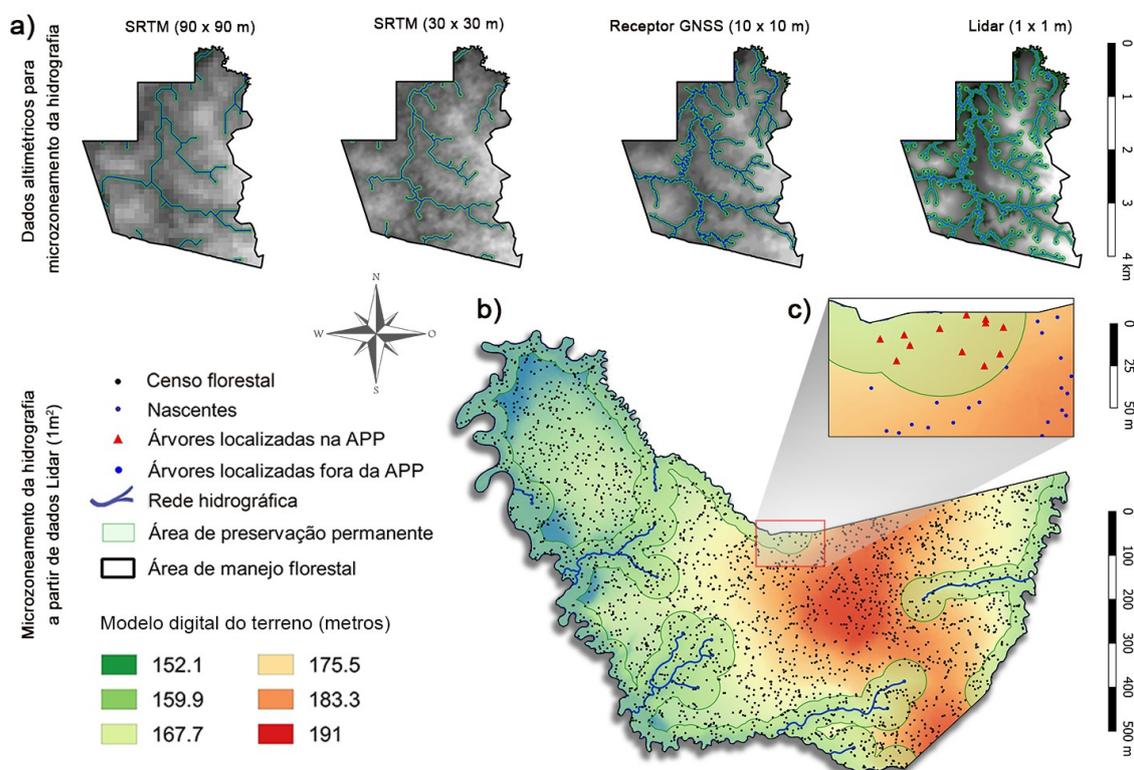


Figura 19. (a) Microzoneamento da hidrografia a partir de diferentes bases de dados altimétricos; (b) delimitação de igarapés, nascentes e áreas de APP a partir do Lidar; (c) classificação das árvores dentro da APP.

Sensores como o Lidar são, extremamente, eficientes para mapeamento dos cursos d'água, porém não são capazes de identificar com exatidão a existência de nascentes, tampouco diferenciam grotas secas de calhas de drenagem. Nesse quesito, o trabalho de campo ainda se faz necessário.

A partir do mapeamento da rede hidrográfica, são definidas as Áreas de Preservação Permanente (APP) e área útil para a exploração madeireira da AMF (figura 19a). Ao analisar as estimativas de área de APP a partir de diferentes dados

altimétricos (Tabela 2), nota-se que o microzoneamento da hidrografia pelo a partir dos dados Lidar proporciona uma maior área de APP e, portanto, menor área útil.

Tabela 2. Estimativa da Área de Preservação Permanente e Área útil de uma área de floresta primária com uso modelagem de bacias hidrográficas a partir de quatro diferentes dados altimétricos.

Base de dados	APP (ha)	APP (%)	Área útil (ha)	Área útil (%)
 SRTM 90 x 90 m	93,95	11,6%	716,05	88,4%
 SRTM 30 x 30 m	107,7	13,3%	702,3	86,7%
 Receptor GNSS	229,90	28,4%	580,10	71,6%
 Lidar	292,6	36,1%	517,4	63,9%

Área total da AMF = 810 ha

Área útil do manejo = (Área total - APP)

2.5.6. Planejamento da infra-estrutura de exploração

O planejamento da infra-estrutura consiste em definir o traçado das estradas destinadas ao escoamento da produção, bem como os pátios de estocagem e as trilhas de arraste (Figura 20). No planejamento sistemático, as estradas e pátios são locados de forma equidistante (SABOGAL et al., 2009), ao passo que no planejamento de precisão as condições ambientais exercem grande influência no desenho da infra-estrutura, que não deve seguir nenhum padrão de distribuição preestabelecido, mas sim respeitar a variação espacial das características físicas e biológicas da paisagem florestal (Quadro 02).

2.5.6.1. Pátio

O planejamento da infra-estrutura realizado pelo conceito do manejo florestal de precisão tem início com a avaliação do número de pátios necessários para a UPA, considerando o critério de distância ótima entre pátios (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007). Nesse cálculo, diversos parâmetros locais da floresta são determinantes para a distância de arraste máximo, no intuito de proporcionar eficiência no processo de arraste. Esse valor normalmente é padronizado entre as empresas florestais, porém deve ser calculado ano a ano visando melhores

rendimentos operacionais em cada UPA (FIGUEIREDO et al., 2007; FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007).

Por essa ótica, o pátio é considerado como a Unidade de Trabalho (UT), e deixa de ser um instrumento de planejamento operacional sistemático, quadrado e distribuído regularmente na UPA (IFT, 2014). Com isso, ele passa a ser variável, proporcional e direcionado à volumetria, a localização e ao número de árvores autorizadas para exploração dentro do raio (área de abrangência) de arraste determinado pátio a pátio (Figura 20b).

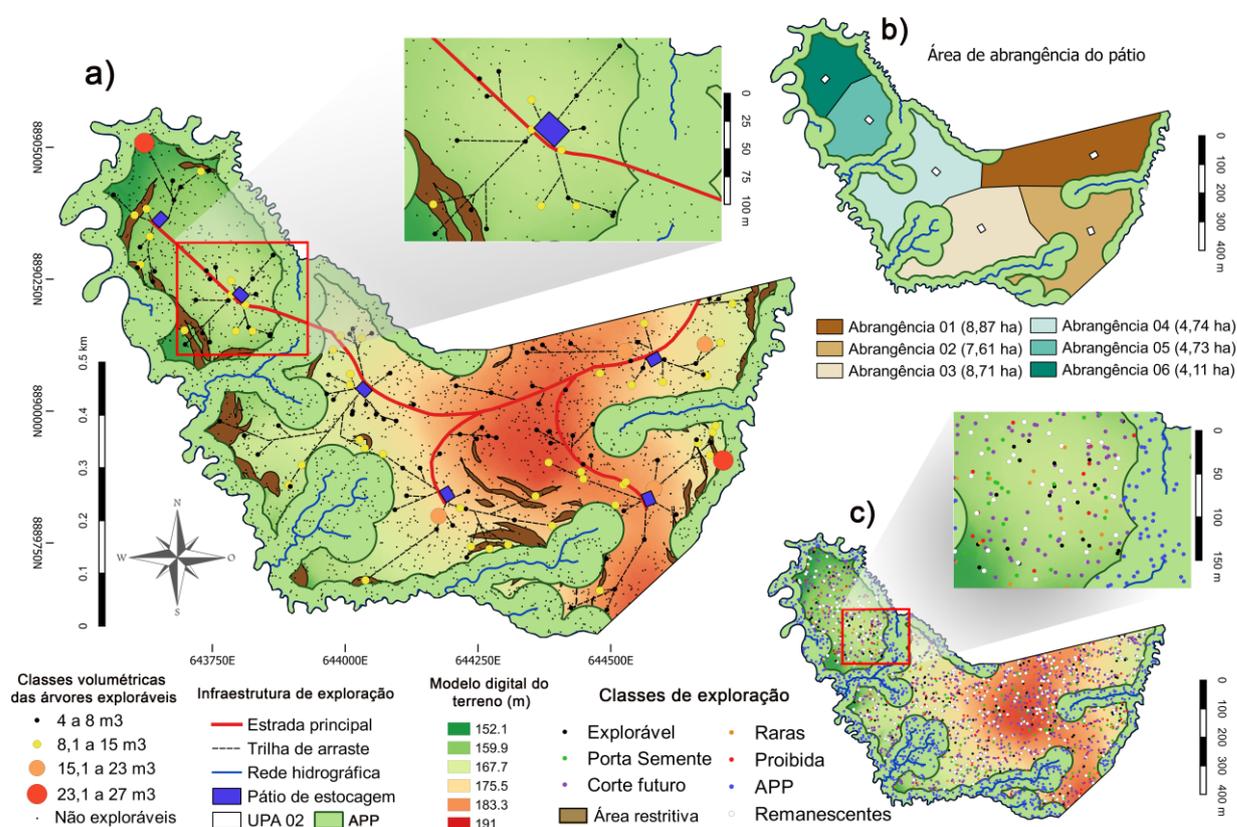


Figura 20. Mapa de exploração da UPA 02 com técnicas de manejo de precisão. (a) Planejamento da infraestrutura de pátios, estradas e trilhas de arraste; (b) área de abrangência do pátio; (c) classificação das árvores.

2.5.6.2. Estrada florestal

As estradas florestais são responsáveis pelo escoamento da produção colhida e agrupada nos pátios distribuídos pela floresta. O desenho das estradas no manejo de precisão tem como critério prioritário a variação topográfica da área e as áreas de preservação permanente (APPs) (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007). A

construção de pontos e acesso pela APP é feita sempre que necessário, porém, no manejo de precisão, busca-se evitar ao máximo a intervenção nessas áreas, por elevarem o custo da estrada com a construção de pontes e pelo impacto causado em rios e igarapés.

As estradas principais são traçadas no planejamento passando pelos divisores de águas, áreas de cotas mais altas e acessíveis, e evitando áreas de declividade acidentada, áreas de baixada e zonas de acesso restrito para veículos florestais. As secundárias são aquelas vias que conectam os pátios à rede principal de estradas, tem largura inferior às estradas principais e também devem respeitar as condições de topografia e hidrografia mapeadas no microzoneamento da UPA.

2.5.6.3. Trilha de Arraste

O planejamento das trilhas de arraste tem como papel fundamental auxiliar na delimitação da Unidade de Trabalho de cada pátio (Figura 20b). O traçado das trilhas deve ligar pela menor distância as árvores aos pátios. O conjunto de trilhas forma uma rede de trilhas em forma de espinha de peixe. Em campo, o operador do trator de arraste usa as informações do planejamento da trilha para auxiliar no traçado do eixo principal das trilhas, porém as variações de campo são muitas e não são consideradas integralmente no planejamento do escritório.

Quadro 2: Estrutura para tomada de decisão quanto ao planejamento da infraestrutura de exploração em uma Unidade de Produção Anual (UPA) conforme conceitos do manejo florestal de precisão.

Infra estrutura de planejamento		Critérios ambientais e produtivos para implantação da infraestrutura de pátios, estradas e trilhas de arraste		
Ordem de planejamento e objetivo		Hidrografia	Terreno	Árvores exploráveis
1º Pátio	Estocar a madeira cortada dentro da sua área de abrangência	Localizar fora da APP de igarapés, nascentes e de declividade	Localizar preferencialmente em áreas planas, fora das zonas restritas	Próximo a áreas com maior concentração volumétrica ou árvores de maior volume
2º Estrada	Escoar a produção estocada nos pátios por vias de acesso secundárias e primárias	Evitar passar pela APP. Caso não haja outra alternativa, selecionar local que terá menor impacto ambiental pela construção de ponte e da estrada na APP	Traçar estrada pelos divisores de água. Evitar zonas restritivas por declividade	Evitar o arraste de toras pela estrada. Respeitar limite normativo.
3º Trilha	Delimitar área de abrangência do pátio e indicar para qual pátio cada árvore irá ser arrastada	Evitar passar pela APP	Evitar arraste em locais com alta declividade.	Identificar as árvores dentro da distância ótima de arraste de cada pátio. Evitar trilhas de arraste maiores que a distância máxima de arraste

2.5.7. Atividades pós-exploratórias

As atividades pós-exploratórias são aquelas realizadas depois do fim da exploração com objetivo de amenizar e monitorar os impactos causados pela atividade exploratória. Sabogal et al. (2000) citam algumas delas: avaliação da exploração, manutenção da infra-estrutura, corte de cipós, desbaste e liberação de copas, condução da regeneração natural e plantio de enriquecimento.

A principal contribuição do manejo florestal de precisão na atividade pós-exploratória é a mensuração exata da área aberta pela infraestrutura de pátio, estradas e trilhas. Isso é possível porque todas as máquinas e operadores utilizam receptores GNSS para executar o projeto em campo (FIGUEIREDO; BRAZ; D'OLIVEIRA, 2007). Como consequência, as operações são todas geomonitoradas diariamente, por equipe, ou até mesmo de forma individualizada, por operário. Esse grau de informação é muito importante no gerenciamento operacional durante a implementação do projeto de manejo.

Para o monitoramento do crescimento da floresta, é fundamental que sejam feitas frequentes medições por meio de parcelas permanentes. Os dados coletados nas parcelas podem ser correlacionados com variáveis obtidas pelo Lidar ou mesmo por ARPs. Desta forma é possível monitorar toda área da UPA utilizando sensores remotos, com trabalho de campo localizado apenas em áreas de interesse após análise aérea.

2.6. CONCLUSÃO

O manejo florestal na Amazônia está em constante transformação, influenciado pela quantidade e qualidade das informações disponíveis, bem como por estudos de avaliação de impacto e monitoramento contínuo de florestas exploradas, que subsidiam a elaboração de leis e regulamentações para o setor.

As inovações tecnológicas, como o GNSS, Lidar e ARPs, têm papel importante em diversas etapas do PMFS, pois são ferramentas de trabalho capazes de gerar grande quantidade de dados de campo essenciais para a elaboração de projetos adaptados às condições locais da paisagem florestal, fortalecendo as técnicas de exploração de impacto reduzido.

Entretanto, a implementação da tecnologia em campo esbarra na falta de condições adequadas de trabalho dentro dos órgãos ambientais, necessidade de atualização das normas de vistoria e elaboração de planos de manejo, carência de técnicos e engenheiros florestais capacitados na área de geoprocessamento e insuficiência de pesquisas de qualidade que abordem o manejo florestal na Amazônia.

O desmatamento insustentável e a oferta de madeira ilegal também são obstáculos para a adoção das tecnologias no manejo, pois prejudicam a competitividade daqueles empreendedores que atuam no mercado com madeira tropical legal e necessitam de investimento para inovar no setor.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING (ASPRS). **LAS specification**. Version 1.4-R6, 2011. 18 p. Disponível em <<https://www.asprs.org/>> Acesso em 06 mai. 2018.
- BALDECK, C. A; COLGAN, M.S.; FERET, J.B.; LEVICK, S.R.; MARTIN, R.E., ASNER, G.P. Landscape-scale variation in plant community composition of an African savanna from airborne species mapping. **Ecological Applications**, v. 24, n. 1, p. 84–93, 2014.
- BALIEIRO, M. R.; ESPADA, A. L. V.; NOGUEIRA, O.; PALMIERI, R.; LENTINI, M. **As concessões de florestas públicas na Amazônia brasileira: um manual para pequenos e médios produtores florestais**. Piracicaba, SP: Imaflora; Belém, PA: IFT, 2010. 204 p.
- BLASCHKE, T.; TIEDE, D.; HEURICH, M. 3D Landscape metrics to modelling forest structure and diversity based on laser scanning data. **Sustainable Development**, v. 36, p. 129-132, 2004.
- BRANCALION, P.H.S.; ALMEIDA, D.R.A, DE.; VIDAL, E.; MOLIN, P.G.; SONTAG, V.E.; SOUZA, S.E.X.F.; SCHULZ, M.D. Fake legal logging in the Brazilian Amazon. **Science Advances**, v. 4, n. 8, p. 1-7, 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa n. 5, de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável – PMFSs nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Seção 1, Brasília, 13 dez. 2006. Disponível em: <<http://exmam.com.br/arquivos/IN05-06doMMA-manejoflorestal.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2017.
- BRASIL. Norma de Execução nº 1, de 24 de abril de 2007. Altera as normas técnicas para o manejo florestal na Amazônia. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 83, Seção 1. p.91, 2007.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Serviço Florestal Brasileiro (SFB). **Edital de licitação para concessão florestal da Floresta Nacional de Caxiuanã**. Concorrência n. 01, de agosto de 2015. Anexo 12: fichas de parametrização de indicadores para fins de classificação e bonificação do edital de concessão

Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/documentos/concessoes-florestais>>
Acesso em: 24 maio 2017.

BRASIL. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n. 6.938, de 31 de agosto de 1981, n. 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e n. 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n. 4.771, de 15 de setembro de 1965, e n. 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória n. 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 28 maio. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm. Acesso em: 01 mar. 2016.

BRAZ, E. M. Planejamento das atividades de exploração florestal em floresta tropical úmida. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE COMPENSADO E MADEIRA TROPICAL, 2.; FEIRA DE MÁQUINAS E PRODUTOS DO SETOR MADEIREIRO, 1., Belém/PA, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: SENAI, p. 139-144, 1994.

BRAZ, M. E.; FIGUEIREDO, E. O.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; PASSOS, C. A. M. Manejo florestal de precisão: modelo digital de exploração e manejo de florestas naturais. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d' (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007, p. 17-29.

BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P. Manejo de produção em florestas naturais da Amazônia: mitos e verdades. **Nativa, Sinop**, v. 3, n. 4, p. 292-295, out./dez. 2015.

CAVALCANTE, L. M. Conceitos cartográficos: sistema de referência. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d' (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007, p. 33-44.

CLARK, D. B.; CLARK, D. A. Abundance, growth and mortality of very large trees in neotropical lowland rain forest. **Forest Ecology and Management**, v. 80, p. 235-244, jan. 1996.

CONDÉ, T. M.; TONINI, H. Fitossociologia de uma floresta ombrófila densa na Amazônia Setentrional, Roraima, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 3, p. 247-260, set. 2013.

- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 406, de 02 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de plano de manejo florestal sustentável (PMFS) com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 26, Seção 1, p. 100, 6 fev. 2009.
- 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.
- D'OLIVEIRA, M. V. N de; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. A. de. **Uso do Lidar como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 130 p.
- D'OLIVEIRA, M.V.N de; SILVA, M. **Lidar identifica fenômeno natural em áreas de floresta no Acre**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/21186905/lidar-identifica-fenomeno-natural-em-area-de-floresta-no-acre>>. Acesso em: 12 abr. 2018.
- DETTO, M. et al. Spatial variability in tropical forest leaf area density from multireturn lidar and modeling. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 120, n. 2, p. 294-309, 2015.
- DRAKE, J. B. et al. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2–3, p. 378–392, 2002a.
- DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; CLARK, D. B.; KNOX, R. G.; BLAIR, J. B.; HOFTON, M. A.; CHAZDON, R. L.; WEISHAMPEL, J. F.; PRINCE, S. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, n. 2-3, p. 305–319, fev. 2002b.
- FERREIRA, C. A.; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P. de; SANTOS, A. F. de; AZEVEDO, C.P. de; LIMA, R. M. B.; NEVES, E. J. M.; SCHWENGBER, D. R.; ARAÚJO, H. J. B. **Manejo florestal na Amazônia Brasileira (situação atual e perspectivas)**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 1999. 20 p. (Embrapa Florestas, Série Documentos, 37).

- FIGUEIREDO, S. M. de M.; VENTICINQUE, E. M.; FIGUEIREDO, E. O.; FERREIRA, E. J. L. Predição da distribuição de espécies florestais usando variáveis topográficas e de índice de vegetação no leste do Acre, Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 45, n. 2, p. 167-174, 2015.
- FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007.
- FIGUEIREDO, E. O. Sistema de Informações Geográficas: aplicações básicas pelo Arcgis. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d' (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007a, p. 47-62.
- FIGUEIREDO, E. O. Diagnóstico da Hidrografia da Área do Manejo In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d' (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007b, p. 65-82.
- FIGUEIREDO, E. O. Diagnóstico dos destaques topográficos da área de manejo florestal. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d' (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007c, p. 85-99.
- FIGUEIREDO, E. O.; CUNHA, R. M. da. Levantamento das árvores com coordenadas apropriadas com GPS de alta sensibilidade. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. d' (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007, p. 103-118.
- FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; CUNHA, R. M. Processamento primário dos dados e elaboração do mapa de exploração. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007. p. 121-149.
- FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. Execução e monitoramento das operações de campo. In: FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais**: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007, p. 151-169.
- FIGUEIREDO, E. O.; MOURA, D. C. de S.; FIGUEIREDO, S. M. M.; PAPA, D. de A. **Modelagem da hidrografia em planos de manejo e critérios para definição de**

- árvores em APP pelo Modeflora.** Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2009. (Série Embrapa Acre, Circular Técnica, 50).
- FIGUEIREDO, E. O.; LIMA, Q. S. de. **Coeficientes técnicos para o inventário e manejo florestal com emprego do Modelo Digital de Exploração Florestal (Modeflora).** Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2008. (Série Embrapa Acre, Comunicado Técnico, 169).
- FIGUEIREDO, E. O. **Modelagem biométrica para árvores individuais a partir do Lidar em área de manejo de precisão em florestas tropicais na Amazônia Ocidental.** 2014. 86 f. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus/AM, 2014.
- FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. A.; D' OLIVEIRA, M. V. N. Mapeamento Rural 3D de Precisão com o uso do Drone: a base para a vanguarda do planejamento florestal. In: CONGRESSO REGIONAL DE PESQUISA DO ESTADO DO ACRE, 1.; SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFAC, 24. **Anais...** Rio Branco: CNPQ; UFAC; EMBRAPA; FAPAC; IEVAL, 2015.
- FERRAZ, A.; SAATCHI, S.; MALLETT, C.; MEYER, V. Lidar detection of individual tree size in tropical forests. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 183, p. 318-333, set. 2016.
- FREITAS, J. V. de. O manejo florestal de florestas nativas brasileiras (Amazônia). In: SEMINÁRIO PARA DEFINIÇÃO DE METAS NACIONAIS DE BIODIVERSIDADE PARA 2010. Programa Nacional de Florestas (PNF), Brasília/DF, 2010. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/conabio/_arquivos/Joberto.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2017.
- FSC. **Forest Stewardship Council - Conselho de Manejo Florestal.** Disponível em: <<https://br.fsc.org/pt-br/faq>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- GARCÍA, M. et al. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 4, p. 816-830, 2010.
- GARRIDO FILHA, I. **Manejo florestal: questões econômico-financeiras e ambientais.** Estudos Avançados, v. 16, n. 45, p. 91-106, ago. 2002.
- GARMIN. GPSMAP 76 Cx Sirf Star, 2007.
- GARMIN. GPSMAP 64 s Helix Quad GLONASS, 2014.

- GARZON-LOPEZ, C. X.; BOHLMAN, S.A.; OLFF, H.; JANSEN, P.A. Mapping Tropical Forest Trees Using High-Resolution Aerial Digital Photographs. **BIOTROPICA**. v. 0, n. 0, p. 1-9, 2012.
- HOLMGREN, J.; PERSSON, Å.; SÖDERMAN, U. Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1537-1552, 2008.
- HOLMES, T. P.; BLATE, G. M.; ZWEEDE, J. C.; PEREIRA JÚNIOR, R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F.; BAUCH, R. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1-3, p. 93-110, jun. 2002.
- HOMMA, A. K. O. **Extrativismo vegetal na Amazônia: limites e oportunidades**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Oriental. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1993. 202 p.
- HOMMA, A. K. O. **História da agricultura na Amazônia: da era pré-colombiana ao terceiro milênio**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 274 p.
- HYYPÄ, J.; YU, X., KAARTINEN, H.; KUKKO, A.; JAAKKOLA, A., LIANG, X. WANG, Y., HOLOPAINEN, M., VASTARANTA, M.; HYYPÄ, H. Forest Inventory Using Laser Scanning. In: SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. 2. ed. Boca Raton, FL: 13:978-1-4987-7227-3, 2018, p. 380-405.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2ª edição revista e ampliada. Sistema Fitogeográfico. Inventário das Formações Florestais e Campestres. Técnicas e Manejo de Coleções Botânicas. Procedimentos para Mapeamentos**. Rio de Janeiro, RJ – Brasil. p. 271, 2012.
- INSTITUTO FLORESTAL TROPICAL (IFT). **Manejo florestal e exploração de impacto reduzido em florestas naturais de produção da Amazônia**. [s.l.]: Instituto Florestal Tropical, 2014. 31 p. (Informativo técnico 1).
- ITTO. **Internacional Tropical Timber Organization**. Disponível em: <<http://www.itto.int/feature15/>>. Acesso em: 16 ago. 2018.
- JUNTILLA, V. et al. Strategies for minimizing sample size for use in airborne LiDAR-based forest inventory. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 75-85, 2013.

- JUNTTILA, V.; FINLEY, A. O.; BRADFORD, J. B.; KAURANNE, T. Strategies for minimizing sample size for use in airborne LiDAR-based forest inventory. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 75-85, mar. 2013.
- KLOSTERMAN, S.; RICHARDSON, A.D. Observing Spring and Fall Phenology in a Deciduous Forest with Aerial Drone Imagery. **Sensors**, v. 17, p. 1-17, 2017.
- LEFSKY, M. A. et al. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, n. 3, p. 339-361, 1999.
- LEFSKY, M. A. et al. BioOne Research Evolved. **BioScience**, v. 52, n. 1, p. 19-30, 2002.
- LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; SOBRAL, L. **Fatos florestais da Amazônia 2003**. Belém, PA: Imazon, 2003. 110 p.
- LENTINI, M.; PEREIRA, D.; CELENTANO, D.; PEREIRA, R. **Fatos florestais da Amazônia 2005 (Amazonian Forest Facts)**. Belém, PA: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), 2005. 140 p.
- 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, 17., 2015. **Anais...** João Pessoa, PB: INPE, 2015, p. 1494-1501. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0277.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2016.
- LOCKS, C. J. **Aplicações da tecnologia LiDAR no monitoramento da exploração madeireira em áreas de concessão florestal**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.
- LOWE, D.G. Distinctive image features from scaleinvariant keypoints. **International Journal of Computer Vision**, v.60, n. 2, p. 91-110, 2004.
- LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin. **Forest Ecology and Management**, v. 181, n. 3, p. 301-312, 2003.
- MAGNUSSEN, S., BOUDEWYN, P. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. **Canadian Journal of Forest Research**, 28, p.1016–1031, 1998.

- MALTAMO, M. et al. Different plot selection strategies for field training data in ALS-assisted forest inventory. **Forestry**, v. 84, n. 1, p. 23–31, 2011.
- MANLY, B.F.J., **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução** / Bryan F.J. Manly; tradução Sara Ianda Carmona. – 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 229p., 2008.
- MARRA, D.M. **Effects of windthrows on the interaction between tree species composition, forest dynamics and carbon balance in Central Amazon**. PhD Thesis, Universität, Leipzig, 2016.
- MASCARO, J. et al. Evaluating uncertainty in mapping forest carbon with airborne LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3770–3774, 2011.
- MCGAUGHEY, R. J. **FUSION/LDV: Software for Lidar Data Analysis and Visualization**. Washington, DC: United States Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Northwest. Research Station, 2010. 154 p.
- MCCROBERTS, R. E.; CHEN, Q.; WALTERS, B. F. Multivariate inference for forest inventories using auxiliary airborne laser scanning data. **Forest Ecology and Management**, v. 401, p. 295-303, out. 2017.
- MOERMAN, D. E.; ESTABROOK, G. F. The botanist effect: counties with maximal species richness tend to be home to universities and botanists. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 11, p. 1969-1974, 2006.
- MOLIM, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 224 p.
- NIEMI, M. T.; VAUHKONEN, J. Extracting canopy surface texture from airborne laser scanning data for the supervised and unsupervised prediction of area-based forest characteristics. **Remote Sensing**, v. 8, n. 7, p. 1–21, 2016.
- NIJLAND, W.; COOPS, N. C.; MACDONALD, S. E.; NIELSEN, S. E.; BATER, C. W.; STADT, J. J. Comparing patterns in forest stand structure following variable harvests using airborne laser scanning data. **Forest Ecology and Management**, v. 354, p. 272-280, out. 2015.
- PAPA, D. A.; FIGUEIREDO, E. O.; **Modelflora – Modelo Digital de Exploração Florestal**. Rio Branco, AC: Centro de Pesquisa Agroflorestal do Acre, 2011. (Série folder).
- PAPA, D. DE A.; FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N. D.; RODRIGUEZ, L. C. E.; CAMARGO, A. P.; PRATA, G. A.; AMARAL, L. G. DE C.; LARANJA, D. C. F.. **Uso do Lidar no manejo florestal**. p. 2, 2017. (Série Folder).

- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- RANKIN, J. M. Forestry in the Brazilian Amazon. In: PRANCE, G. T.; LOVEJOY, T. E. (Eds.). **Amazonia**. Oxford, UK: Pergamon Press, 1985, p. 369-392. (Key environments series).
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing** Vienna, Austria, 2018.
- REIS, S. L.; COUTO, C. S.; PINHEIRO, C. S.; ESPADA, A. L. V.; LIMA, J. A.; LENTINI, M. W. **Técnicas pré-exploratórias para o planejamento da exploração de impacto reduzido no manejo florestal comunitário e familiar**. Belém: IFT, 2013. 148 p. (Manual Técnico, 3 - IFT).
- RIBEIRO, C. A. A. S. Floresta de precisão. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002, p. 311-335.
- ROUSSEL, J. R.; AUTY, D. **lidR: airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications**, 2018.
- SABOGAL, C.; SILVA, J. N. M.; ZWEEDE, J.; PEREIRA JÚNIOR, R.; BARRETO, P.; GUERREIRO, C. A. **Diretrizes técnicas para a exploração de impacto reduzido em operações florestais de terra firme na Amazônia brasileira**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2000. 217 p.
- SABOGAL, C.; LENTINI, M.; POKORNY, B.; SILVA, J. N. M.; ZWEEDE, J.; VERÍSSIMO, A.; BOSCOLO, M. **Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira: restrições e oportunidades: relatório síntese**. Belém: CIFOR, 2006. 72 p.
- SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. 2. ed. Boca Raton, FL: 13:978-1-4987-7227-3, 2018. v. 31
- SILVA, C. A. et al. Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 554-573, 2016.
- SILVA, J. N. M.; LOPES, J. do C. O.; OLIVEIRA, L. C. de; SILVA, S. M. A da; CARVALHO, J. O. P. de; COSTA, D. H. M.; MELO, M. S.; TAVARES, M. J. M. **Diretrizes para instalação e medição de parcelas permanentes em florestas naturais da Amazônia brasileira**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2005. 60 p.

- STARK, S. C. et al. Linking canopy leaf area and light environments with tree size distributions to explain Amazon forest demography. **Ecology Letters**, v. 18, n. 7, p. 636–645, 2015.
- SMITS, I.; PRIEDITIS, G.; DAGIS, S.; DUBROVSKIS, D. Individual tree identification using different LIDAR and optical imagery data processing methods. **Biosystems and Information Technology**, v. 1, n. 1, p. 19–24, 2012.
- SOBERÓN, J.; PETERSON, A.T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. **Biodiversity Informatics**, 2: 1-10, 2005.
- TORRESAN, C.; CORONA, P.; SCRINZI, G.; MARSAL, J. V. Using classification trees to predict forest structure types from LiDAR data. **Annals of Forest Research**, v. 59, n. 2, p. 281-298, maio 2016.
- TYMEN, B. et al. **Quantifying micro-environmental variation in tropical rainforest understory at landscape scale by combining airborne LiDAR scanning and a sensor network**. *Annals of Forest Science*, v. 74, n. 2, 2017.
- TURNER, D. P.; COHEN, W. B.; KENNEDY, R. E.; FASSNACHT, K. S BRIGGS, J. M. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 70, n. 1, p. 52-68, out. 1999.
- USGS. United State Geological Survey. Disponível em < <https://earthexplorer.usgs.gov> >. Acesso em: 07 abr.2018.
- VALOIS, A. C. C. **Benefícios e estratégias de utilização sustentável da Amazônia**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 75 p. (Texto para Discussão; 18).
- VASTARANTA, M. **Forest mapping and monitoring using active 3D remote sensing**. 2012. 45 f. Dissertations Forestales 144 – Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki, Finlândia, 2012.
- VÉGA, C. et al. On the interest of penetration depth, canopy area and volume metrics to improve Lidar-based models of forest parameters. **Remote Sensing of Environment**, v. 175, p. 32-42, 2016.
- VERISSIMO, A.; BARRETO, P.; MATTOS, M.; TARIFA, R.; UHL, C. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: the case of Paragominas. **Forest Ecology and Management**, v. 55, n. 1-4, p. 169-199, dez. 1992.

- VERÍSSMO, A.; PEREIRA, D. Produção na Amazônia Florestal: características, desafios e oportunidades. **Parceria Estratégica**, Brasília-DF, v. 19, n. 38, p. 13-44, jan./jun. 2014.
- WEST, T. A. P.; VIDAL, E.; PUTZ, F. E. Forest biomass recovery after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 314, p. 59-63, fev. 2014.
- WULDER, M. A.; WHITE, J. C.; NELSON, R. F.; NÆSSET, E.; ØRKA, H. O.; COOPS, N. C.; HILKER, T.; BATER, C. W.; GOBAKKEN, T. Lidar sampling for large-area forest characterization: a review. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 121, p. 196-209, jun. 2012.
- WULDER, M. A.; COOPS, N. C.; HUDAK, A. T.; MORSDORF, F.; NELSON, R.; NEWNHAM, G.; VASTARANTA, M. Status and prospects for LiDAR remote sensing of forested ecosystems. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. SUPPL.1, p. S1-S5, 2013.
- WWF. **World Wide Fund for Nature**. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/certificacao_florestal/>. Acesso em 17 ago. 2018.
- YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística : conceitos + aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.
- YU, X. et al. Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 28–37, 2011.

3. COMO REDUZIR A INTENSIDADE AMOSTRAL DO INVENTÁRIO EM FLORESTAS TROPICAIS A PARTIR DO LIDAR?

RESUMO

Em áreas com alta diversidade, como na região amazônica, o inventário florestal é um grande desafio, pois, quanto maior a variação na estrutura da vegetação, mais parcelas amostrais são necessárias para captar esse gradiente de variabilidade. Uma estratégia para reduzir a intensidade amostral é o inventário estratificado. Técnicas de sensoriamento remoto podem ser usadas para estratificar a vegetação, porém são limitadas para diferenciar pequenas variações em florestas primárias, quando feitas com sensores passivos. O *Ligth detection and ranging* (Lidar) é um sensor ativo capaz de tridimensionalizar a vegetação e tem sido usado com sucesso para estimar parâmetros estruturais, mesmo em florestas tropicais. O objetivo, com esse estudo, foi avaliar a redução da intensidade amostral no inventário florestal a partir da estratificação da vegetação, utilizando-se dados do Lidar. O estudo foi desenvolvido em uma área contínua de 800 hectares, localizada no Acre, em uma floresta primária do tipo umbrófila, aberta, com presença de palmeiras, bambu e manchas de floresta alta. Foi realizado o censo florestal das árvores com diâmetro maior que 40 cm, a 1,3 m de altura do solo, com o qual calculou-se a área seccional de cada árvore. O voo Lidar cobriu toda a área inventariada e foi feito a uma densidade de 14 pts.m², e com ele foram extraídas as métricas Alt_{md} (altura média do dossel), rugosidade (desvio padrão do dossel), Alt_{dossel} (abertura do dossel a 15 m), LAI (índice de área foliar) e LAI_{sub} (LAI entre 5 a 12 m). Na análise dos dados, foram feitas: (i) estimativa dos atributos estruturais derivados do inventário de campo e da nuvem de retornos Lidar para três tamanhos de célula; (ii) correlação de Pearson entre os atributos do campo e do dossel derivados do Lidar; (iii) análise de agrupamento para formação dos estratos pelo método de Ward; (iv) validação (ANOVA) e caracterização dos estratos (PCA); e (v) estimativa de redução da intensidade amostral por meio de uma simulação computacional. A Alt_{md} apresentou a maior correlação ($r = 0,74$) e gerou, pelo critério de Elbow e análise do dendrograma, 4 estratos, com diferença significativa entre eles para a variável de campo. A estratificação com a variável Lidar distinguiu bem a floresta quanto ao seu gradiente de variação estrutural e perfil de densidade da vegetação. O inventário estratificado pela variável Alt_{md} reduziu o número de parcelas em 41% quando comparado ao inventário inteiramente casualizado, para uma mesma incerteza relativa de 10%. O uso de uma única métrica de dossel, derivada do Lidar, foi capaz de estratificar uma área de floresta tropical primária, além de gerar informações adicionais, como o índice de área foliar do sub-bosque e o modelo do terreno que podem auxiliar na tomada de decisão para o manejo, conservação e monitoramento de florestas tropicais.

Palavras-chave: Manejo florestal de precisão; Estratificação; Amazônia

ABSTRACT

Forest inventory in high biodiversity areas, such as amazon region, is a challenge, because larger variations in vegetation structure lead to more sample plots needed to capture this variability gradient. One strategy to reduce sampling intensity is stratified inventory. Remote sensing techniques can be used to stratify vegetation, but are limited to distinguish small variations in primary forests when made with passive sensors. Lidar (Light detection and ranging) is an active sensor capable of tridimensionalizing vegetation and has been used successfully to estimate structural parameters even in tropical forests. The objective of this study was to evaluate the reduction of sampling intensity in the forest inventory from vegetation stratification using Lidar variables. The study was developed in a continuous area of 800 hectares, located in Acre, in open ombrophylous forest with presence of palms, bamboo and dense forest portions. A census inventory of trees with a diameter greater than 40 cm at 1.3 m of breast height (dbh) was made, which the sectional area of each tree was calculated. The Lidar flight covered the entire inventory area with a density of 14 pts.m², with which the CH_{mean} (average canopy height), roughness (standard deviation of the canopy), CH_{openness} (canopy openness of 15 meters), LAI (leaf area index) and LAI_{under} (LAI between 5 to 12 meters of height). The analysis performed on the data were: (i) grid 100 x 100 meters creation and estimation of the structural attributes derived from the field inventory and the return cloud Lidar; (ii) Pearson correlation between the field and canopy attributes derived from the Lidar; (iii) cluster analysis for classify strata by the Ward method; (iv) validation (ANOVA) and characterization of stratas (PCA); and (v) reduction of sample estimation intensity by a computer simulation. CH_{mean} presented the highest correlation ($r = 0.74$) and generated, by the Elbow criterion and dendrogram analysis, 4 strata with significant difference between Lidar metric and field variable. The stratification with the Lidar variable clearly distinguished the forest structural variation gradient and in the vegetation density profile. The stratified inventory by the CH_{mean} variable reduced the number of plots by 41% when compared to the randomized inventory, for the same relative uncertainty of 10%. The use of a single canopy metric derived from Lidar was able to stratify an area of primary rainforest, in addition to generating additional information such as understory leaf area index and the terrain model that can assist in decision making for management, conservation and monitoring of tropical forests.

Keywords: Precision forest management; Stratification; Amazonia

3.1. INTRODUÇÃO

O inventário florestal, realizado pelo método de amostragem da população, estima parâmetros estruturais, como área basal, volume e biomassa de madeira acima do solo, servindo como diagnóstico para o potencial do uso sustentável dos recursos, e conservação florestal (NÆSSET et al., 2013). Em florestas tropicais úmidas, como por exemplo na Amazônia, os parâmetros estruturais apresentam alta variação e, por isso, captar tal diversidade no inventário amostral torna-se um grande desafio: quanto maior for a variação estrutural, maior será o esforço para a quantificação das informações (LU et al., 2003).

Os métodos amostrais comumente adotados variam conforme o objetivo, condições de acesso, topografia, hidrografia, tipologia florestal e tamanho da área a ser inventariada. Em áreas pequenas, que normalmente têm pouca variação no terreno e na vegetação, costuma-se adotar a amostragem casual simples, em que se faz a aleatorização de todas as parcelas cabíveis na população para implementação do inventário (COCHRAN, 1977). Na medida em que as áreas destinadas ao inventário aumentam em tamanho, como ocorre com empreendimentos florestais privados e nas concessões de florestas públicas, as variações topográficas, hidrográficas e fitofisionômicas da paisagem florestal tendem a ser mais heterogêneas e, conseqüentemente, mais difíceis de se caracterizar.

A má escolha do método amostral, sua intensidade e a distribuição espacial das parcelas podem gerar vieses nas coletas de campo e afetar a estimativa dos parâmetros florestais de interesse (JUNTTILA et al., 2013; MOERMAN; ESTABROOK, 2006; OLIVEIRA et al., 2017). Uma das formas de amenizar o erro do inventário é aumentar a intensidade amostral, entretanto, esse procedimento nem sempre é viável por motivos logísticos e, principalmente, devido ao valor elevado. A alternativa seria conhecer, previamente, como a variação estrutural se distribui sobre a área de interesse, e assim, traçar uma estratégia de amostragem capaz de captar o máximo do gradiente de variação ambiental com o mínimo de esforço amostral (MALTAMO et al., 2011; NIEMI; VAUHKONEN, 2016).

A amostragem estratificada proporciona a redução da intensidade amostral, pois consiste na subdivisão da floresta em grupos com maior similaridade entre si. Ou seja, a variação dentro de cada estrato é menor que a variação total da população (COCHRAN, 1977; TIPTON, 2013). Contudo, a estratificação de florestas tropicais é

um grande desafio devido a sua alta complexidade e densidade de vegetação (ALEXANDER; KORSTJENS; HILL, 2017; TORRESAN et al., 2016). A combinação de fatores ambientais climáticos, associados à variação topográfica, características edáficas e dinâmica florestal reúne o leque de possíveis causas dos padrões e processos relacionados à diversidade das florestas tropicais (CLARK; CLARK, 1996; CONDÉ; TONINI, 2013; FIGUEIREDO et al., 2015; NIJLAND et al., 2015).

Com o advento do sensoriamento remoto, sobretudo na última década, parte desses fatores passou a ser classificada e mapeada com precisão, principalmente aqueles relacionados a macroestruturas da paisagem, como a variação topográfica e uso do solo (IBGE, 2012). Entretanto, existem limitações nos sensores orbitais que afetam o grau de confiabilidade, principalmente na classificação da estrutura da vegetação e caracterização ecológica da paisagem (LEFSKY et al., 2002; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Em geral, os sensores passivos são sensíveis a mudanças na biomassa de florestas jovens e homogêneas, com eficiência satisfatória na estimativa de biomassa e índice de área foliar para alguns biomas (DRAKE et al., 2002; LEFSKY et al., 2002). Contudo, em florestas maduras e heterogêneas como as florestas tropicais, a resposta espectral não é suficiente para prever mudanças na biomassa e volume, pois os índices de vegetação e fração vegetação saturam a partir de determinado índice foliar (MCROBERTS; CHEN; WALTERS, 2017; TURNER et al., 1999) e geram incerteza na diferenciação de fitofisionomias (LU, 2005; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

As técnicas de sensoriamento remoto ativo, bem como a geociência, vêm se desenvolvendo muito rapidamente ano a ano, tornando-se cada vez mais acessíveis e presentes no gerenciamento de florestas nativas. O *Light Detection and Ranging* (Lidar) se destaca como um sensor remoto com a capacidade de incidir em todo gradiente de altura e profundidade da superfície-alvo (JUNTTILA et al., 2013; LEFSKY et al., 2002; VASTARANTA, 2012; WULDER et al., 2013), captando informação referente à terceira dimensão do espaço, altura, sendo tal atributo de extrema importância na representação da paisagem florestal e de processos ecológicos que ocorrem no espaço multidimensional (LEFSKY et al., 2002). Assim, a altimetria a laser passa a captar tridimensionalmente aspectos estruturais da floresta, com os quais faz-se a correlação com os parâmetros ecológicos observados em campo.

Um número crescente de estudos tem confirmado o uso do Lidar para estimar, modelar e caracterizar variáveis estruturais e ecológicas da cobertura florestal, como: individualização e abundância de árvores (FERRAZ et al., 2016; GORGENS et al., 2015; SILVA et al., 2016; YU et al., 2011); forma de copa (BARNES et al., 2017; FIGUEIREDO, 2014); índice de área foliar e perfil da vegetação (ALMEIDA et al., 2016; DETTO et al., 2015; STARK et al., 2012); área basal (MAGNUSSEN et al., 2012; LEFSKY et al., 1999); carbono e biomassa (D'OLIVEIRA et al., 2012; SILVA et al., 2015; MASCARO et al., 2011; NÆSSET; GOBAKKEN, 2008; SILVA et al., 2018); e demografia das árvores (STARK et al., 2015).

Na medida que o Lidar aerotransportado (*Airborne Laser Scanner* – ALS) vai sendo incorporado ao gerenciamento e planejamento de atividades florestais, seja em áreas de floresta nativa ou plantada, novas formas de se obter dados referentes à vegetação passam a vigorar, substituindo ou complementando os métodos analógicos de biometria adotados atualmente. No manejo florestal, a altimetria a laser já proporciona benefícios para tomada de decisão pela qualidade e acurácia de informações geradas sobre a floresta, antes mesmo de se ir a campo. Estudos mostram que a classificação da vegetação derivada dos dados ALS proporciona vantagens ao método amostral a ser implementado em campo, pois permite que sejam definidas estratégias de alocação de parcelas conforme características de cada estrato, proporcionando inclusive redução de custos (DASH; MARSHALL; RAWLEY, 2015; JUNTILA et al., 2013; MCROBERTS; CHEN; WALTERS, 2017). Contudo, faltam estudos que quantifiquem o potencial de estratificação florestal, usando sensoriamento remoto ALS (MALTAMO et al., 2011; NIEMI; VAUHKONEN, 2016), principalmente, em florestas tropicais complexas de difícil distinção estrutural

Desta forma, o objetivo desse estudo é mapear e classificar a variação estrutural da vegetação com dados ALS para avaliar a redução da intensidade amostral proporcionada pelo inventário estratificado em florestas tropicais. Para isso, foram utilizados dados de campo (inventário censo), sobrevoo Lidar em uma área de floresta primária de 800 hectares na Amazônia ocidental e uma simulação amostral com três diferentes tamanhos de parcelas.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida no campo experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Acre, no município de Rio Branco ($10^{\circ} 01' 22''$ S, $67^{\circ} 40' 3''$ W), localizada às margens da BR 364 (Figura 1).

A área florestal da propriedade tem 960 hectares, e nela foi realizado o inventário censitário em 800 ha. A hidrografia (Figura 1e) é caracterizada por uma vasta rede de drenagens derivadas do igarapé Liberdade, que corta a propriedade no sentido sul/norte (RODRIGUES et al., 2001).

A altimetria do terreno (Figura 1d) tem amplitude de 63 m, variando de 147 m a 210 m. O relevo varia de plano a ondulado e o solo tem alta concentração de argila de baixa permeabilidade (RODRIGUES et al., 2001). A classificação climática da região, conforme Koppen, é Aw (ALVARES et al., 2013), equatorial quente e úmido, com temperatura média anual de $24,3^{\circ}\text{C}$ e precipitação média anual de 1.950 mm (ACRE, 2010).

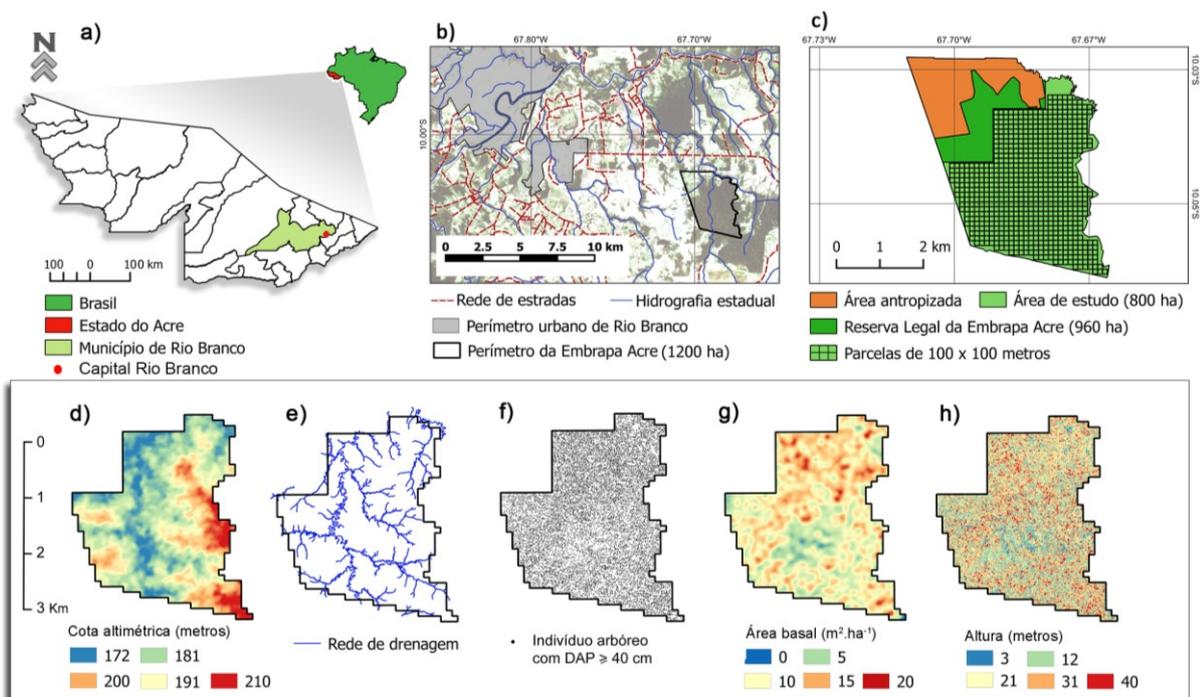


Figura 1. (a) Área de estudo, Acre; (b) região do entorno da área de estudo, Rio Branco, AC; (c) campo experimental da Embrapa Acre com grade de células; (d) modelo digital do terreno (MDT) com resolução de 1 metro; (e) rede hidrográfica; (f) inventário florestal censitário de 25.957 indivíduos; (g) distribuição da área basal de indivíduos com DAP ≥ 40 cm; (h) modelo de altura do dossel (MAD) em resolução de 2 metros.

3.2.1.1. Caracterização da vegetação

Estudos prévios na área descrevem a ocorrência de três principais aspectos da vegetação: floresta densa, floresta secundária e floresta aberta (D'OLIVEIRA, 1994; RODRIGUES et al., 2001). A floresta densa tem como característica a ocorrência de árvores de grande porte, tais como castanheira - *Bertholletia excelsa* (Bonpl.), cumaru-ferro - *Dipteryx odorata* (Aubl.), Wild e garapa - *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr, presença de dossel fechado e com baixa densidade de vegetação no sub-bosque, devido à baixa penetração de luz. Nas áreas de floresta secundária, os autores relatam uma vegetação de porte médio a alto, com descontinuidade no dossel, entrada de luz indireta no interior da floresta e com presença de palmeiras, cipós e bambus ocupando diferentes alturas no estrato vertical do perfil da floresta. As áreas de floresta aberta são caracterizadas pelo maior distanciamento entre indivíduos arbóreos dominantes e presença dominante do bambu (*Guadua weberbaueri Pilger*) e lianas que se alastram impedindo a regeneração de indivíduos arbóreos e palmeiras (região centro-sul da área de estudo - Figura 1g) (RODRIGUES et al., 2001).

Existem, na área, aproximadamente 235 espécies arbóreas de 65 famílias botânicas diferentes, com volume médio de $130 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, abundância média de 32 indivíduos por hectare ($\text{ind}.\text{ha}^{-1}$) e área basal média de $10 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ – referente aos indivíduos com diâmetro a partir de 40 cm, e a 1,30 metro de altura do solo (DAP) (Figura 1f). Esses estudos corroboram com a classificação dada pelo Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) à vegetação da macrorregião do entorno onde localiza-se a área de estudo, a qual é do tipo Floresta Aberta, com Palmeira, Bambu e Floresta Densa. Segundo o ZEE, essa vegetação faz parte de um total de vinte e um tipos presentes no estado do Acre, sendo caracterizada como “[...] uma floresta predominantemente aberta, sem formação de dossel fechado, com presença de palmeiras, trepadeiras, manchas com bambu e regiões com maior densidade florestal” (ACRE, 2010).

3.2.2. Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada em duas etapas: inventário florestal censitário de campo e sobrevoo Lidar aerotransportado (ALS).

3.2.2.1. Coleta de dados de campo

O inventário florestal de campo foi realizado em 800 hectares, entre junho de 2014 e janeiro de 2015. No censo, foi tomado o CAP, circunferência a 1,30 metro de altura do solo, de 22.957 indivíduos arbóreos com DAP \geq 40 cm. Cada árvore recebeu uma placa numérica referencial, foi georreferenciada com receptor GNSS de navegação, modelo Garmin 76 CSx (GARMIN, 2007) e teve sua área seccional calculada a partir da circunferência medida em campo. A área basal por hectare foi obtida pela soma das áreas seccionais dos indivíduos contidos nas células de 100 x 100 metros (1 hectare).

3.2.2.2. Coleta de dados Lidar

O sobrevoo Lidar foi realizado em 2015, logo após o término do inventário. Foi utilizada uma aeronave CESSNA, modelo 206, equipada com sensor Lidar Harrier 68i da Trimble, na frequência de operação de 300 kHz, ângulo de escaneamento de até 22° e *footprint* de 30 cm. A densidade média de retornos foi de 14 pts.m² (Figura Suplementar 1 - S1), com número de retornos superior a 4 pts.m² em 98,8% da área e precisão horizontal de \pm 0,2 cm e, vertical de \pm 0,45 cm. A velocidade média do avião foi de 200 km/h, a uma altura de 600 metros e com largura de faixa de aproximadamente 490 metros.

3.2.2.3. Processamento dos dados Lidar

O perfilhamento ALS gerou 169 milhões de pontos, sendo que, deste total, 37 milhões foram classificados como pontos de solo via algoritmo de interpolação pelo método de predição linear SCOP (TRIMBLE; GEO, 2014). A partir dos pontos de solo, com densidade média de 0,43 pts.m², foi produzido o Modelo Digital do Terreno (MDT), com resolução de 1x1 metro, utilizando-se do método de interpolação pelo vizinho mais próximo, com ponderação pelo inverso da distância, implementado em ambiente R pelo pacote "lidR" (ROUSSEL; AUTY, 2018). Em seguida, foi feita a normalização da nuvem de pontos Lidar, pela diferença entre a cota de elevação do MDT e o valor de altura de cada ponto da nuvem (ROUSSEL; AUTY, 2018).

Foi executado um algoritmo de filtro de retornos espúrios na nuvem normalizada, com retornos com altura negativa e que não representam a vegetação, como pássaros e retornos aleatórios que se dão na atmosfera. O algoritmo realizou uma varredura em toda a nuvem (com uma janela de 50 x 50 m), eliminando os *outliers* superiores (retornos com valores maiores que terceiro quartil mais uma vez e meia o interquartil) e também aqueles retornos máximos que eram, pelo menos, 0,5 metro maior que o quinto retorno mais elevado. Essa última etapa foi eficaz na eliminação de pontos que não foram classificados como *outliers*, e provavelmente eram pássaros. O filtro foi checado a partir de uma análise visual da nuvem normalizada.

O modelo de altura do dossel (MAD) foi calculado pelos pontos máximos da nuvem normalizada e filtrada numa resolução de 2x2 metros. O MAD foi usado para gerar os seguintes atributos estruturais do dossel, dentro de cada parcela (delineamento amostral descrito no próximo tópico): (i) altura média do dossel (Alt_{md}) (média do MAD); (ii) rugosidade (desvio padrão do MAD); e (iii) abertura do dossel ($Abert_{dossel}$) (fração do MAD abaixo do limite de 15 metros). Como o fechamento do dossel nas florestas tropicais costuma ocorrer a partir de 15 m de altura (ASNER et al., 2012), acrescido ao fato de que outros estudos adotam esse parâmetro em suas práticas (ALMEIDA et al., 2016), tomou-se a medida de 15 m como referência para a identificação de clareiras na área de estudo.

O número de retornos Lidar no gradiente de altura da floresta também foi utilizado para determinar a métrica do perfil vertical da vegetação (*Leaf Area Density* - LAD) e o índice de área foliar (*Leaf Area Index* - LAI). A partir da nuvem de pontos ALS de cada célula, foram criadas células tridimensionais (*voxels*) com resolução horizontal (x e y) de 2 m² e resolução vertical (z) de 1 metro, com as quais foi possível estimar a variação volumétrica da densidade da vegetação (LAD) pela equação de *McArthur and Horn* (1969) (ALMEIDA et al., 2016; STARK et al., 2012). Esse método tem como princípio a razão entre o número de retornos que chegam em um *voxel* e o número de retornos que saem (ALMEIDA et al., 2016). Foram estabelecidos dois atributos associados à densidade da vegetação: (iv) LAI (soma do perfil do LAD), e (v) LAD_{sub} (soma do LAD entre 5 e 12 metros).

3.2.3. Análise de dados

A análise dos dados foi composta por cinco etapas: (i) criação da grade de células e estimativa dos atributos estruturais derivados do inventário de campo e da nuvem de retornos ALS; (ii) correlação entre os atributos do dossel (derivados do ALS) com o atributo de interesse (área basal); (iii) análise de agrupamentos para formação dos estratos; (iv) validação e caracterização dos estratos; e por fim, (v) estimativa de redução do esforço amostral. As etapas são descritas a seguir.

A área de estudo foi dividida em células de 100 x 100 metros (1 ha), totalizando 723 hectares. Para cada célula foram calculados o atributo de campo (área basal) e os atributos estruturais do dossel florestal (descritas no tópico anterior). Posteriormente, foi realizada análise de correlação de Pearson, para selecionar o atributo estrutural do dossel utilizado na estratificação. A estratificação foi realizada por análise de agrupamento hierárquico (método de Ward) (MANLY, 2008), agregando as células com maior similaridade, tendo como referência apenas um atributo do dossel. O número de grupos foi estabelecido pelo método de Elbow (TIPTON, 2013). A qualidade do agrupamento foi verificada a partir do índice de correlação cofenética, e a consistência dos grupos, pelo *scree plot* (MANLY, 2008) e dendrograma (MANLY, 2008).

A validação dos estratos (grupos) foi feita a partir de um teste de ANOVA *posthoc Tukey* (R CORE TEAM, 2018), tendo como variável preditora os estratos e como variável resposta a área basal. A caracterização dos estratos foi realizada por análise de componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) (R CORE TEAM, 2018) e gráfico Biplot (KASSAMBARA; MUNDT, 2017; MANLY, 2008).

Por fim, foi feita uma simulação computacional emulando inventários florestais, comparando delineamento amostral estratificado *versus* inteiramente casualizado (aleatório) para três tamanhos diferentes de parcelas (1, 0,5 e 0,25 hectares). A seleção das parcelas foi feita a partir da grade de células respectiva de cada tamanho, sendo de forma ponderada por estrato no inventário estratificado e aleatória no inteiramente casualizado. Para cada nível de intensidade amostral (número de parcelas no inventário), que variou de 10 até 60, realizaram-se 1.000 iterações, e foram sumarizados sua média e desvio padrão, a fim de se produzir um gráfico para mostrar a incerteza relativa (erro-amostragem vezes *t* tabelado dividido pela média da área basal) em função da intensidade amostral. Contrastou-se o

inventário estratificado com o inteiramente casualizado para os três tamanhos de parcela e nos diferentes números de estratos. O limite de corte estabelecido para comparação entre os delineamentos estratificado e inteiramente casualizado foi de 10% de incerteza relativa, limite de erro de amostragem admissível em inventários para planos de manejo florestal (BRASIL, 2007).

As notações e os estimadores do inventário estratificado são apresentados a seguir (COCHRAN, 1977). O sufixo h denota o estrato, e i , a unidade dentro de cada estrato.

$$\hat{\mu}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} y_{hi} \quad \text{Média da variável } y \text{ (área basal } m^2 \cdot ha^{-1}) \text{ em cada } i\text{-ésimo estrato;} \quad (1)$$

$$\hat{\mu}_{Str} = \sum_{h=1}^H W_h \hat{\mu}_h \quad \text{Média da variável (área basal } m^2 \cdot ha^{-1}) \text{ no estrato;} \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_h^2 = \frac{1}{n_h - 1} \sum_{i=1}^{n_h} (y_{hi} - \hat{\mu}_h)^2 \quad \text{Variância estimada (} m^4 \cdot ha^{-1} \text{) de } y \text{ (área basal) em cada } i\text{-ésimo estrato;} \quad (3)$$

$$V\hat{a}r(\hat{\mu}_{Str}) = \sum_{h=1}^H W_h^2 \frac{\hat{\sigma}_h^2}{n_h} \quad \text{Variância estimada (} m^4 \cdot ha^{-1} \text{) da média estratificada (população infinita);} \quad (4)$$

$$S(\hat{\mu}_{Str}) = \pm \sqrt{V\hat{a}r(\hat{\mu}_{Str})} \quad \text{Erro padrão da média (área basal } m^2 \cdot ha^{-1}) \text{ estimada.} \quad (5)$$

N = número total de parcelas; N_h = número total de parcelas por estrato; n_h = número da parcelas no estrato; y_{hi} = valor obtido *para* i -ésima parcela; $W_h = \frac{N_h}{N}$ = peso do estrato.

3.3. Resultados

Para a etapa de estratificação da vegetação foi selecionado o atributo estrutural Altura Média do Dossel (Alt_{md}), por ter o maior valor de correlação com a área basal de campo (Figura 2a).

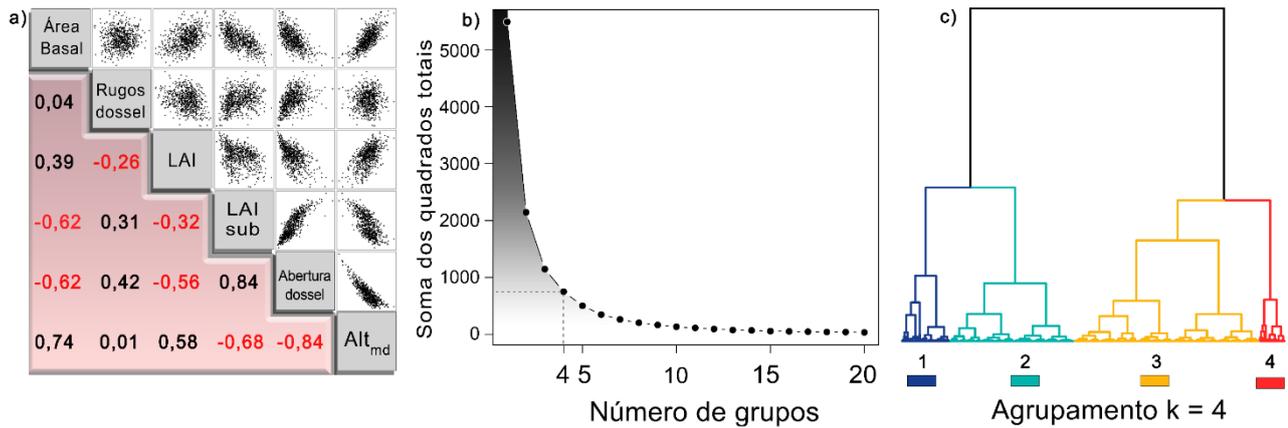


Figura 2. a) Correlograma dos atributos estruturais do dossel (derivados do Lidar) com a área basal ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$) mensurada em campo; (b) scree plot pelo método de Elbow; (c) dendrograma obtido pelo método de Ward.

Pelo método de Elbow (Figura 2b), adotou-se o número ótimo de grupos como sendo $k = 4$. No dendrograma (Figura 2c) é possível notar as células classificadas nos quatro grupos. Os valores de média e desvio padrão das variáveis obtidas para células de 100×100 estão descritos na Tabela 1. Nota-se que a média da área basal e a média da altura do dossel crescem positivamente do estrato 01 ao 04 (Tabela 01 e Figura 3a).

Tabela 1. Sumário estatístico dos atributos da vegetação para os quatro estratos. DP (desvio padrão da área basal em $\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$); LAI (índice de área foliar em $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$).

Variáveis de campo e Lidar	Estrato 01		Estrato 02		Estrato 03		Estrato 04	
	média	desvio padrão						
Área basal ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$)	5,92	2,03	8,97	2,28	11,26	2,29	14,58	2,7
Altura média do dossel (metros)	19,2	1,54	22,52	0,78	25,48	1,09	29,24	1,24
Rugosidade (metros)	8,68	1,19	8,86	1,13	8,83	1,22	8,87	1,17
LAI ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$)	1,72	0,32	1,97	0,03	2,21	0,28	2,43	0,27
LAI sub-bosque ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$)	0,57	0,09	0,44	0,01	0,35	0,1	0,28	0,07
Abertura dossel (%)	0,35	0,08	0,22	0,06	0,14	0,05	0,08	0,04

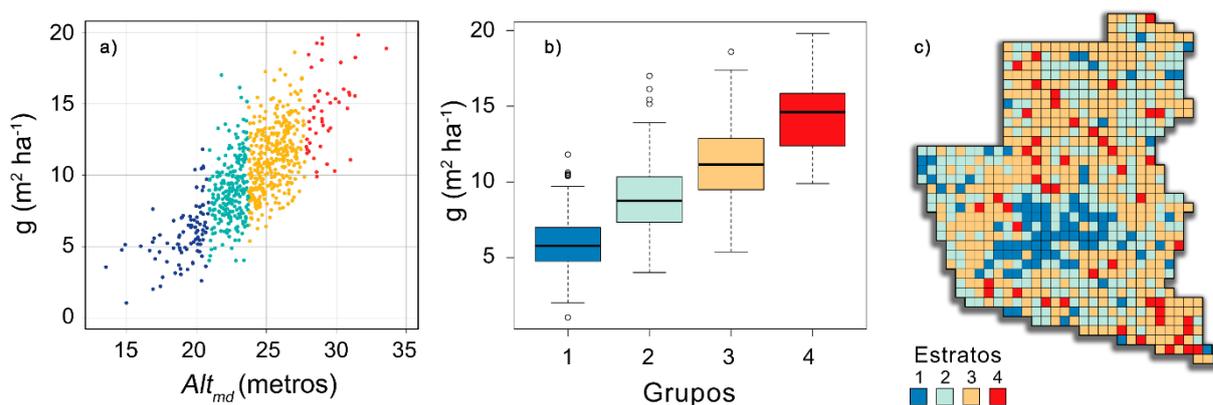


Figura 3. (a) Análise de dispersão dos dados de área basal (campo) e Altura média do dossel (Alt_{md}); (b) boxplot dos dados de área basal para cada um dos quatro grupos criados na análise de agrupamento com a Altura média do dossel; (c) mapa de células classificadas por estrato.

A partir dessa classificação as células foram submetidas a uma ANOVA *posthoc* Tukey, que resultou em diferença significativa de 5% para a média da área basal entre todos os estratos (Figura 3b). O mapa (Figura 3c) mostra como os quatro grupos estão distribuídos na área de estudo.

Na análise de componentes principais, as variáveis $Abert_{dossel}$ (*autovetor* = 0,55), Alt_{md} (*autovetor* = -0,50), LAI_{sub} (*autovetor* = 0,48), e o LAI (*autovetor* = -0,39) representam juntas, no primeiro componente (Z1), o gradiente de variação estrutural da floresta. Esse gradiente pode ser notado, tanto no perfil de vegetação (Figura 4b) dos quatro estratos separadamente, quanto na variação da altura e abertura do dossel da floresta (Figuras 4c e 4d). O baixo peso da variável Rugosidade (*autovalor* = 0,23) no primeiro componente mostra que essa variável foi pouco expressiva na caracterização dos grupos.

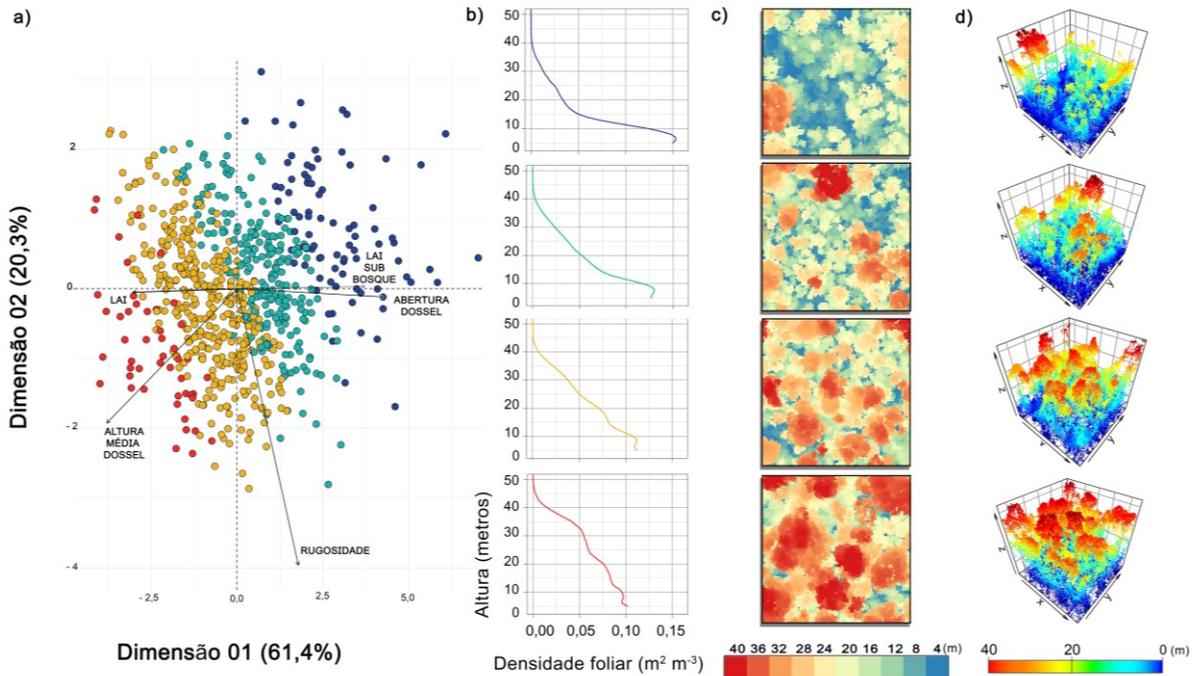


Figura 4. (a) Biplot da PCA das células de 100x100 agrupadas em quatro estratos (cores); (b) perfil da vegetação médio para os estratos; (c) característica média do MAD em uma célula de 1 ha para cada estrato (a parcela foi selecionada de acordo com o valor médio da altura do dossel); (d) nuvem de pontos das células selecionadas dentro de cada estrato.

A redução da intensidade amostral foi estimada para os três tamanhos de parcela, com diferentes classes de estratificação e incerteza relativa fixada em 10% (Tabela 2). Não foi possível calcular as estatísticas de média e desvio padrão no inventário simulado para 6 e 7 estratos nas parcelas de 1 e 0,5 hectare, pois o número ponderado de parcelas em um dos estratos foi menor que 2, logo não tem variância.

Tabela 2. Estimativa de redução da intensidade amostral para inventário estratificado em k estratos para tamanhos de parcelas de 1, 0,5 e 0,25 hectare. a* Número de estratos selecionado pelo método de Elbow. ** Número de estratos sem diferença significativa em pelo menos um par de estratos. NA (*not available*) número de parcelas menor que dois em pelo menos um dos estratos.

Tamanho da parcela	Simulação	K2		K3		K4 *		K5		K6		K7 **	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
100 x 100 metros (1 ha)	Estratificado	34	4,7%	30	4,1%	27	3,7%	25	3,5%				
	Aleatório	46	6,4%	46	6,4%	46	6,4%	46	6,4%	NA		NA	
	Redução		26%		35%		41%		46%				
70 x 70 metros (0,5 ha)	Estratificado	53	3,5%	45	3,0%	44	2,9%	42	2,8%				
	Aleatório	76	5,1%	76	5,1%	76	5,1%	76	5,1%	NA		NA	
	Redução		30%		41%		42%		45%				
50 x 50 metros (0,25 ha)	Estratificado	89	3,0%	80	2,7%	75	2,5%	69	2,3%	67	2,2%	67	2,2%
	Aleatório	122	4,0%	121	4,0%	122	4,0%	121	4,0%	120	4,0%	119	3,9%
	Redução		27,00%		33,90%		38,50%		43,0%		44,20%		43,70%

A simulação computacional (Figura 5) ilustra a diferença estimada entre a amostragem estratificada e inteiramente casualizada para os três tamanhos de parcelas analisados.

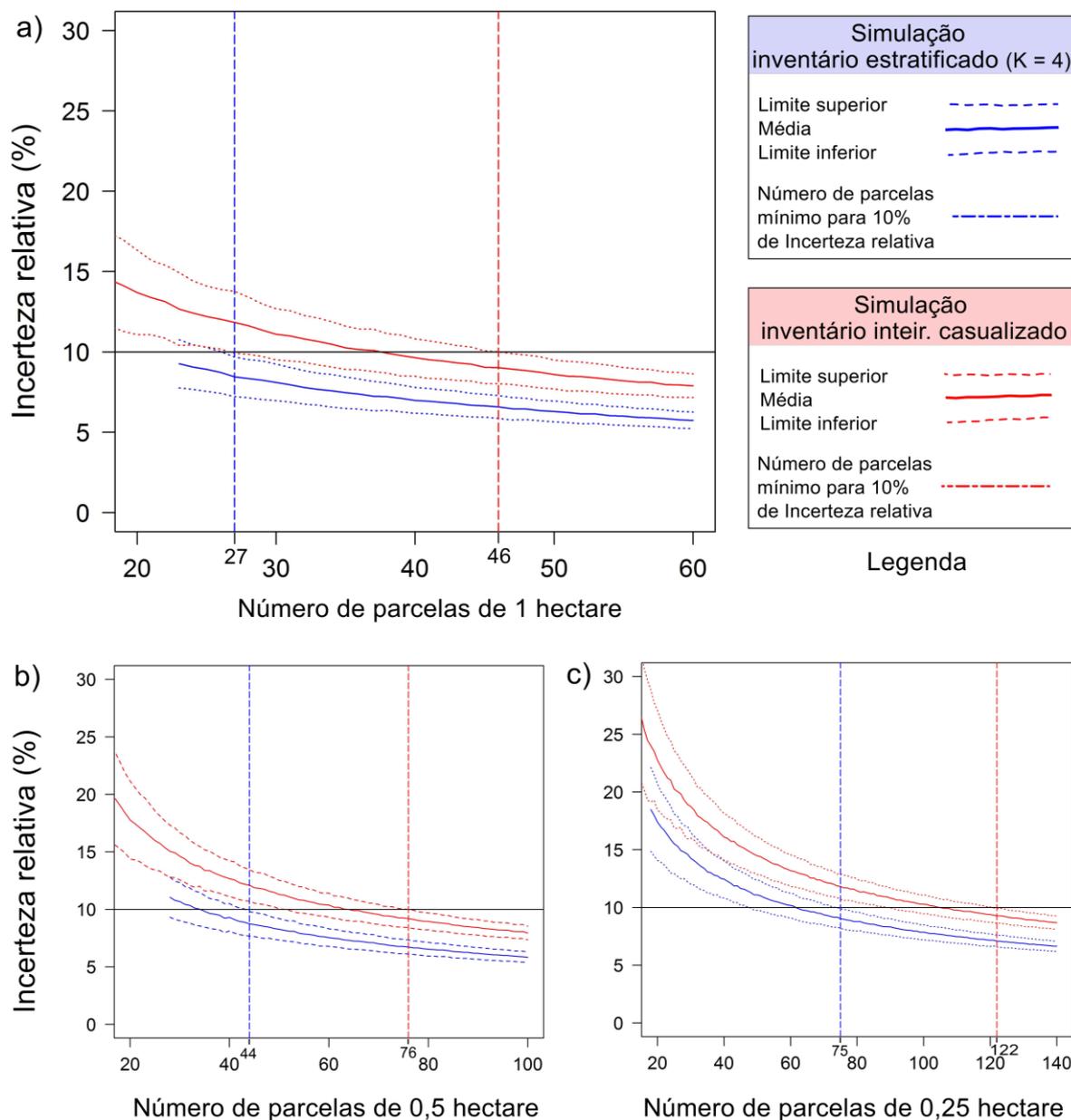


Figura 5. Simulação computacional do inventário estratificado em quatro estratos ($K = 4$) (azul) versus inteiramente casualizado (vermelho) para três tamanhos de parcelas: (a) 100 x 100 metros; (b) 70 x 70 metros; e (c) 50 x 50 metros.

3.4. Discussão

Até o nosso conhecimento, este é o primeiro trabalho que analisa o potencial da tecnologia ALS para reduzir a intensidade amostral de campo em inventários florestais na Amazônia. De maneira geral, o Lidar foi capaz de gerar estratos consistentes com a variável de campo área basal, reduzindo o esforço amostral em até 41%.

Aqui decidiu-se utilizar a área basal, por ser uma variável de campo mensurada e não estimada. Ainda assim, outros parâmetros de interesse que podem ser estimados por equações, como a volumetria e a biomassa de madeira, também apresentaram eficiência em sua estratificação (Figura Suplementar 1).

O critério de *Elbow* mostrou ser eficiente para determinar número de estratos ($k = 4$), pois os quatro grupos foram diferentes significativamente quanto à área basal. Contudo, o potencial de estratificação da área basal utilizando a métrica Lidar Alt_{md} foi ainda maior. No presente trabalho, foram evidenciados até seis estratos ($k = 6$) com diferenças significativas entre si, estabelecidos a partir do agrupamento, com utilização da altura do dossel. Portanto, não há necessidade de adotar o critério de *Elbow* com rigidez, apesar de ser um bom indicador para determinar o número ótimo de grupos.

Por outro lado, nota-se que a escolha de muitos estratos gera pouco ganho adicional nas estimativas (Tabela 2), podendo até ser ineficaz por particionar a população em número pequeno de amostras dentro de cada grupo, aumentando a variância das estimativas (MCROBERTS; GOBAKKEN; NÆSSET, 2012) ou até impossibilitando o cálculo da amostragem ponderada por estrato. A exemplo disso pode-se notar na Tabela 2 o decréscimo na redução da intensidade amostral ao aumentar de 6 para 7 o número de grupos na simulação em parcelas de 0,25 ha.

A correlação entre a média da altura do dossel (Alt_{md}) e área basal a nível de parcela pode ser explicada pela sensibilidade do Lidar em captar a altura das árvores dominantes e co-dominantes que ocupam o dossel da floresta e que se relacionam positivamente com diâmetro de caule e área basal (ASNER et al., 2002, 2012; BAKER; WILSON, 2000; SULLIVAN et al., 2017).

Entretanto, as relações alométricas entre tamanho e forma de árvores podem variar de floresta para floresta, ou mesmo de árvore para árvore (DAHLE; GRABOSKY, 2009; LEFSKY et al., 1999; MÄKELÄ; VALENTINE, 2006). Por isso, nem

sempre o uso de uma única variável Lidar será eficiente na distinção de tipologias e parâmetros florestais (biomassa, área basal), visto que uma floresta com uma estrutura mais homogênea e de pouca variação na altura do dossel poderá gerar baixa correlação entre Lidar e campo (BAKER; WILSON, 2000; KENNEL et al., 2013; PALACE et al., 2015).

No nosso estudo, a utilização da altura média do dossel para a estratificação também foi eficiente para ordenar outros parâmetros estruturais do dossel (Figura 4a). Florestas com menor altura possuem maior abertura de dossel e, conseqüentemente, maior densidade de vegetação do sub-bosque (LAI_{sub}). A rugosidade do dossel foi relativamente alta (~ 9 metros) em todos os estratos, portanto, não serve como um bom parâmetro de estratificação neste caso. Essa variação da altura do dossel pode ser explicada pela natureza do tipo de floresta estudada, que é predominantemente aberta, intercalada com aglomerados de árvores dominantes, clareiras de tamanhos e estágios de sucessão diferentes e ocorrência de lianas e bambu em áreas com maior incidência de luz.

O uso do Lidar na diferenciação de padrões florestais está associado ao ganho em estimativas, redução de erros de predição e otimização do desenho amostral. Hawbaker et al. (2009) alcançaram uma redução de 68% no erro de previsão de modelos para as variáveis diâmetro, área basal e biomassa ao analisar separadamente, em estratos, uma vegetação mista com predominância de pinus e espécies decíduas. Heurich e Thoma (2008), também analisaram florestas temperadas heterogêneas de forma estratificada e obtiveram menores valores de RMSE (erro médio quadrático) para estimativa área basal e volume (~15%), quando comparados ao RMSE da população (30%). Além da melhoria nas estimativas, a estratificação permite a redução na quantidade de parcelas necessárias para captar o gradiente de variação da floresta. Isso proporciona redução da intensidade amostral.

McRoberts, Chen e Walters (2017) conseguiram reduzir em até 35% o tamanho da área amostral, sem perder precisão nos estimadores, a partir da estratificação feita com métrica de altura do dossel, em uma floresta mista de pinus e árvores decíduas, que apresentou correlação (r) = 0,81 com a variável de campo área basal. No presente estudo, houve redução da área amostral na medida em que a população foi agrupada em número k maior de estratos, variando de 26 até 46% de ganhos.

Quanto ao tamanho das parcelas, nota-se que a redução da intensidade amostral do inventário estratificado foi maior para as parcelas de 0,5 hectare, com exceção de $k = 5$. Porém, em termos de área, as parcelas de 1 hectare apresentaram maior ganho (3,7% ou 19 hectares) quando comparada aos outros dois tamanhos de parcelas: 0,5 ha (2,9% ou 16 hectares) e 0,25 ha (2,5% ou 12 hectares). Outra vantagem da parcela de 1 hectare é poder captar melhor o gradiente de variação da vegetação com um menor número de amostras em campo.

Os benefícios da estratificação podem ser associados a ganhos econômicos proporcionados pela redução da intensidade amostral. McRoberts, Gobakken e Næsset (2012) compararam o custo do sobrevoo Lidar com o custo de campo referente à instalação de mais 50% de área amostral, necessários para atingir a mesma redução da variância obtida no inventário estratificado. Os valores de custo encontrados foram muito semelhantes, porém os autores destacam que o investimento no levantamento a laser gera outros benefícios, tais como o modelo digital do terreno e a locação otimizada de parcelas em campo. Entretanto, ainda são raros os estudos que avaliam a viabilidade econômica do uso do Lidar em condições comerciais, seja em floresta plantada ou nativa. Tilley et al. (2005) sugerem que o uso do Lidar tende a ser mais vantajoso economicamente em grandes extensões de floresta, em locais de difícil acesso por terra, com alto custo para coleta de dados de campo e desde que haja boa correlação entre as variáveis Lidar e parâmetros florestais ($R^2 \geq 0,7$).

Em uma breve analogia ao que fizeram McRoberts, Gobakken e Næsset (2012), presume-se que a redução da intensidade amostral obtida nesse estudo gere, como consequência, a diminuição dos custos de implantação de parcelas a partir da amostragem estratificada da floresta com ALS. Para fins de exemplificação, pode-se contabilizar os custos do voo Lidar como sendo de US\$33,00/ha e, da instalação de parcelas de inventário de árvores com DAP \geq a 10 cm, como sendo de US\$1.500,00/ha. Esses valores são aproximados e foram obtidos a partir de consulta a empresas especializadas que prestam serviços de sobrevoo Lidar e inventário florestal na região amazônica alvo deste estudo. A diferença entre o número de parcelas do inventário estratificado e o inteiramente casualizado foi de 19 parcelas de 1 hectare, que custaria, aproximadamente, US\$28.500,00, para serem instaladas e medidas. Esse valor é levemente superior ao custo total do ALS, estimado em US\$26.400,00 para a área total sobrevoada neste trabalho.

Além da redução da intensidade amostral resultante da estratificação, o prévio conhecimento da estrutura da vegetação, proporcionado pelo Lidar, traz inúmeras vantagens para o manejo de florestas tropicais, como, por exemplo: a possibilidade de gerar mapas volumétricos que auxiliam no planejamento das unidades de exploração; identificação de clareiras e áreas de baixo potencial madeireiro; monitoramento do crescimento volumétrico e da biomassa florestal após atividades de colheita; e levantamento de informações que otimizam as operações de colheita em campo, como a modelagem do terreno, dos cursos d'água e a densidade da vegetação no sub-bosque. Nota-se, portanto, a relevância dos estudos sobre ALS aplicados à realidade florestal, pois este passa a gerar atributos estruturais impraticáveis de serem coletados de forma contínua, rápida e com acurácia em grandes áreas de floresta, sendo, assim, fundamental para tomada de decisão em ações de manejo (WULDER et al., 2012).

3.5. Conclusão

A altura média do dossel da floresta, obtida a partir do sobrevoo Lidar, foi boa preditora da variação da área basal das árvores com potencial madeireiro ($DAP \geq 40\text{cm}$) em florestas primárias do tipo aberta com palmeira, bambu e manchas de floresta densa.

O sensor remoto Lidar aerotransportado foi eficiente no planejamento do inventário florestal amostral a partir da estratificação da vegetação, reduzindo a o número de unidades amostrais em 41%, de 46 para 27 parcelas de 1 hectare, com 4 estratos. A estratificação também proporcionou redução da intensidade amostral em inventários com parcelas de 0,5 e 0,25 hectare, porém, com menor área amostral e maior número de parcelas de campo.

Os resultados do uso do Lidar em áreas de floresta primária passíveis de manejo florestal na Amazônia trazem grandes vantagens, considerando os elevados custos e esforços realizados para realização de inventário diagnóstico em campo. Além disso, o Lidar gera informações estratégicas para o planejamento da exploração madeireira e conservação da paisagem florestal.

3.6. Material suplementar

3.6.1. Figuras

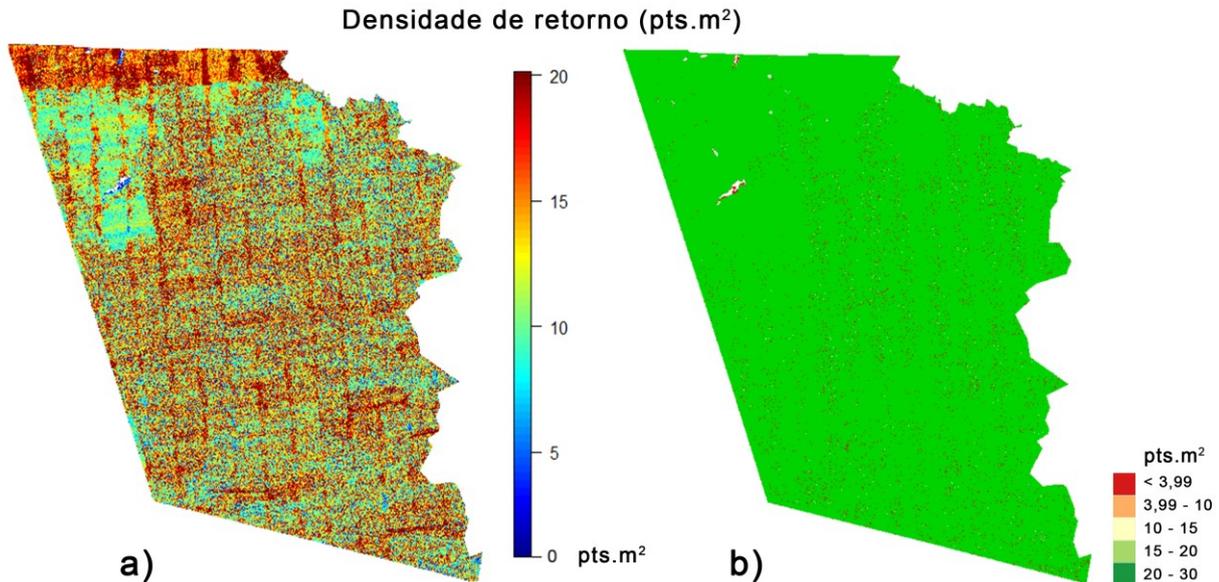


Figura S1: (a) Densidade de pts.m²; (b) densidade de pontos maiores que 4 pts.m² (98,8%).

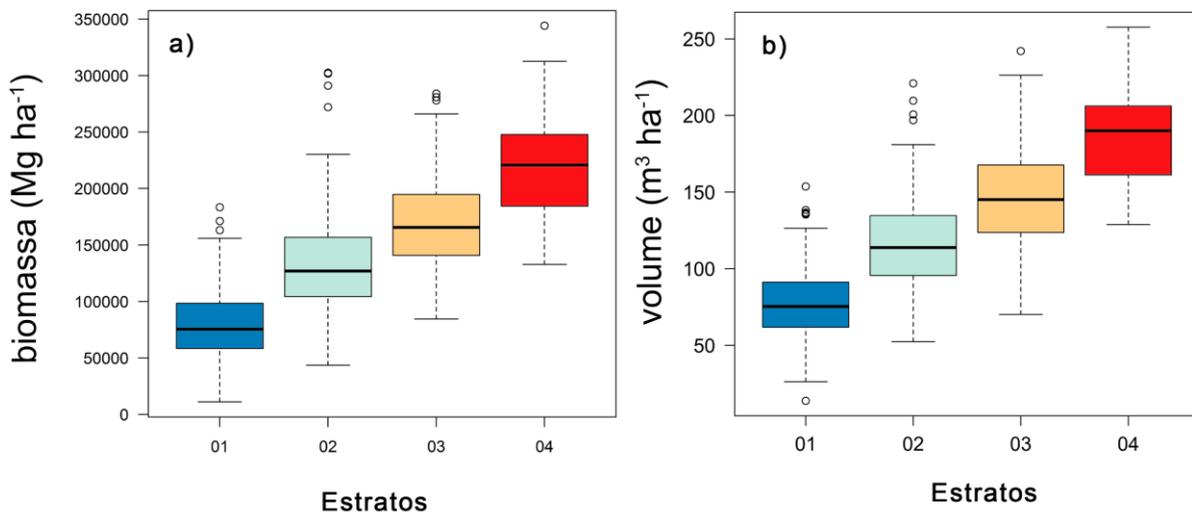


Figura S2: (a) Boxplot dos dados de biomassa (CHAVE, et al., 2014) para cada um dos quatro grupos criados na análise de agrupamento com a métrica Lidar Alt_{md}; (b) boxplot dos dados de volume (NOGUEIRA, et al., 2008) para cada um dos quatro grupos criados na análise de agrupamento com a métrica Lidar Alt_{md}



Figura S3: Abertura de dossel com ocorrência de bambu e lianas.



Figura S4: Presença de árvores de grande porte em locais com abertura de dossel, intercaladas com ocorrência de bambu e lianas.



Figura S5: Queda natural de árvores de grande porte



Figura S6: Obstrução da luz por bambu a uma altura de 4 a 12 metros



Figura S7: Área com dossel fechado e ocorrência de árvores de grande porte.



Figura S8: Árvores com identificação por placa sequencial e localização geográfica.

REFERÊNCIAS

- ACRE. Governo do estado do Acre. **Zoneamento ecológico econômico do Acre: fase II – escala 1:250.000 – documento síntese**. 2. ed. Rio Branco: SEMA Acre, 2010. (Coleção Temática do ZEE; v. 4).
- ALEXANDER, C.; KORSTJENS, A. H.; HILL, R. A. Structural attributes of individual trees for identifying homogeneous patches in a tropical rainforest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 55, p. 68-72, mar. 2017.
- ALMEIDA, D. R. A. de; NELSON, B. W.; SCHIETTI, J.; GORGENS, E. B.; RESENDE, A. F.; STARK, S. C.; VALBUENA, R. Contrasting fire damage and fire susceptibility between seasonally flooded forest and upland forest in the Central Amazon using portable profiling LIDAR. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 184, p. 153-160, out. 2016.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.
- ASNER, G. P.; PALACE, M.; KELLER, M.; PEREIRA JÚNIOR, R.; SILVA, J. N. M.; ZWEEDE, J. C. Estimating canopy structure in an Amazon Forest from laser range finder and IKONOS satellite observations. **Biotropica**, v. 34, n. 4, p. 483-492, 2002.
- ASNER, G. P.; MASCARO, J.; MULLER-LANDAU, H.C.; VIELLEDENT, G.; VAUDRY, R.; ROSAMOELINA, M.; HALL, J.S.; VAN BREUGEL, M.,. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. **Oecologia**, v. 168, n. 4, p. 1147–1160, 2012.
- BAKER, P. J.; WILSON, J. S. A quantitative technique for the identification of canopy stratification in tropical and temperate forests. **Forest Ecology and Management**, v. 127, n. 1-3, p. 77-86, mar. 2000.
- BARNES, C.; BALZTER, H.; BARRETT, K.; EDDY, J.; MILNER, S.; SUÁREZ, J. C. Airborne laser scanning and tree crown fragmentation metrics for the assessment of *Phytophthora ramorum* infected larch forest stands. **Forest Ecology and Management**, v. 404, p. 294-305, nov. 2017.

- BRASIL. Norma de Execução nº 1, de 24 de abril de 2007. Altera as normas técnicas para o manejo florestal na Amazônia. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 83, Seção 1. p.91, 2007.
- CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W.B.C.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P.M.; GOODMAN, R.C.; HENRY, M.; MARTÍNEZ-YRÍZAR, A.; MUGASHA, W.A.; MULLER-LANDAU, H.C.; MENCUCCINI, M.; NELSON, B.W.; NGOMANDA, A.; NOGUEIRA, E.M.; ORTIZ-MALAVASSI, E.; PÉLISSIER, R.; PLOTON, P.; RYAN, C.M.; SALDARRIAGA, J.G.; VIEILLEDENT, G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.
- CLARK, D. B.; CLARK, D. A. Abundance, growth and mortality of very large trees in neotropical lowland rain forest. **Forest Ecology and Management**, v. 80, p. 235-244, jan. 1996.
- COCHRAN, W. G. **Sampling techniques**. 3rd edition. New York: Wiley, 1977.
- CONDÉ, T. M.; TONINI, H. Fitossociologia de uma floresta ombrófila densa na Amazônia Setentrional, Roraima, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 3, p. 247-260, set. 2013.
- D'OLIVEIRA, M. V. N. **Composição florística e potenciais madeireiro e extrativista em uma área de floresta no Estado do Acre**. Rio Branco: EMBRAPA-CPAF-Acre, 1994. (Série EMBRAPA-CPAF-AC, Boletim de pesquisa, 9).
- 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, set. 2012.
- DAHLE, G. A.; GRABOSKY, J. C. Review of literature on the function and allometric relationships of tree stems and branches. **Arboriculture & Urban Forestry**, Champaign, v. 35, n. 6, p. 311-320, nov. 2009.
- DASH, J. P.; MARSHALL, H. M.; RAWLEY, B. Methods for estimating multivariate stand yields and errors using k-NN and aerial laser scanning. **Forestry**, Oxford, v. 88, n. 2, p. 237-247, abr. 2015.
- DETTO, M.; ASNER, G. P.; MULLER-LANDAU, H. C.; SONNENTAG, O. Spatial variability in tropical forest leaf area density from multireturn lidar and modeling.

- Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 120, n. 2, p. 294-309, fev. 2015.
- DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; CLARK, D. B.; KNOX, R. G.; BLAIR, J. B.; HOFTON, M. A.; CHAZDON, R. L.; WEISHAMPEL, J. F.; PRINCE, S. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, n. 2-3, p. 305–319, fev. 2002.
- FERRAZ, A. SAATCHI, S.; MALLET, C.; MEYER, V. Lidar detection of individual tree size in tropical forests. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 183, p. 318-333, set. 2016.
- FIGUEIREDO, E. O. **Modelagem biométrica para árvores individuais a partir do Lidar em área de manejo de precisão em florestas tropicais na Amazônia Ocidental**. 86, 2014. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus/AM, 2014.
- FIGUEIREDO, S. M. de M.; VENTICINQUE, E. M.; FIGUEIREDO, E. O.; FERREIRA, E. J. L. Predição da distribuição de espécies florestais usando variáveis topográficas e de índice de vegetação no leste do Acre, Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 45, n. 2, p. 167-174, 2015.
- GARMIN. GPSMAP 76 Cx Sirf Star, 2007.
- GORGENS, E. B.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SILVA, A. G. P. da; SILVA, C. A. Identificação de árvores individuais a partir de levantamentos laser aerotransportado por meio de janela inversa. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 91-96, jan./mar. 2015.
- HAWBAKER, T. J.; KEULER, N.S.; LESAK, A.A.; GOBAKKEN, T.; CONTRUCCI, K; RADELOFF, V.C., Improved estimates of forest vegetation structure and biomass with a LiDAR-optimized sampling design. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 114, n. 3, p. 1–11, 2009.
- HEURICH, M.; THOMA, F. Estimation of forestry stand parameters using laser scanning data in temperate, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*) forests, in: **Forestry**. p. 645-661, 2008
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2ª edição revista e ampliada. Sistema Fitogeográfico. Inventário das Formações Florestais e Campestres. Técnicas**

e Manejo de Coleções Botânicas. Procedimentos para Mapeamentos. Rio de Janeiro, RJ – Brasil. p. 271, 2012.

JUNTTILA, V.; FINLEY, A. O.; BRADFORD, J. B.; KAURANNE, T. Strategies for minimizing sample size for use in airborne LiDAR-based forest inventory. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 75-85, mar. 2013.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Factoextra**: extract and visualize the results of multivariate data analysis, 2017.

KENNEL, P.; TRAMON, M.; BARBIER, N.; VINCENT, G. Canopy height model characteristics derived from airborne laser scanning and its effectiveness in discriminating various tropical moist forest types. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 24, p. 8917-8935, nov. 2013.

LEFSKY, M. A.; HARDING, D.; COHEN, W. B.; PARKER, G.; SHUGART, H. H. Surface Lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 67, p. 83-98, jan. 1999.

LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; ACKER, S. A.; PARKER, G. G.; SPIES, T. A.; HARDING, D. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 70, n. 3, p. 339-361, dez. 1999.

LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; PARKER, G. G.; HARDING, D. J. Lidar remote sensing for ecosystems studies. **BioOne Research Evolved**, v. 52, n. 1, p. 19-30, jan. 2002.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin. **Forest Ecology and Management**, v. 181, n. 3, p. 301-312, 2003.

LU, D. Integration of vegetation inventory data and Landsat TM image for vegetation classification in the western Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 213, n. 1-3, p. 369-383, jul. 2005.

MAGNUSSEN, S. NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T.; FRAZER, G. W. A fine-scale model for area-based predictions of tree-size-related attributes derived from LiDAR canopy heights. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 27, n. 3, p. 312-322, 2012.

- MÄKELÄ, A.; VALENTINE, H. T. Crown ratio influences allometric scaling in trees. **Ecology**, v. 87, n. 12, p. 2967-2972, dez. 2006.
- MALTAMO, M.; BOLLANDAS, O.M.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T.; PACKALÉN, P., Different plot selection strategies for field training data in ALS-assisted forest inventory. **Forestry** 84, 23–31, 2011.
- MANLY, B.F.J., **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução** / Bryan F.J. Manly; tradução Sara Ianda Carmona. – 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 229p., 2008.
- MASCARO, J.; DETTO, M.; ASNER, G. P.; MULLER-LANDAU, H. C. Evaluating uncertainty in mapping forest carbon with airborne LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 12, p. 3770-3774, dez. 2011.
- MCROBERTS, R. E.; CHEN, Q.; WALTERS, B. F. Multivariate inference for forest inventories using auxiliary airborne laser scanning data. **Forest Ecology and Management**, v. 401, p. 295-303, out. 2017.
- MCROBERTS, R. E.; GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E. Post-stratified estimation of forest area and growing stock volume using lidar-based stratifications. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 125, p. 157-166, out. 2012.
- MOERMAN, D. E.; ESTABROOK, G. F. The botanist effect: counties with maximal species richness tend to be home to universities and botanists. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 11, p. 1969-1974, 2006.
- NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 6, p. 3079-3090, jun. 2008.
- NÆSSET, E.; BOLLANDSÅS, O. M.; GOBAKKEN, T.; GREGOIRE, T. G.; STÅHL, G. Model-assisted estimation of change in forest biomass over an 11 year period in a sample survey supported by airborne LiDAR : a case study with post-stratification to provide “activity data”. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 128, p. 299-314, jan. 2013.
- NIEMI, M. T.; VAUHKONEN, J. Extracting canopy surface texture from airborne laser scanning data for the supervised and unsupervised prediction of area-based forest characteristics. **Remote Sensing**, v. 8, n. 7, p. 1–21, 2016.
- NIJLAND, W.; COOPS, N. C.; MACDONALD, S. E.; NIELSEN, S. E.; BATER, C. W.; STADT, J. J. Comparing patterns in forest stand structure following variable

harvests using airborne laser scanning data. **Forest Ecology and Management**, v. 354, p. 272-280, out. 2015.

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**, 256 (11), p. 1853-1867. 2008.

OLIVEIRA, U.; SOARES FILHO, B. S.; PAGLIA, A. P.; BRESCOVIT, A. D.; CARVALHO, C. J. B. de; SILVA, D. P.; REZENDE, D. T.; LEITE, F. S. F.; BATISTA, J. A. N.; BARBOSA, J. P. P. P.; STEHMANN, J. R.; ASCHER, J. S.; VASCONCELOS, M. F. de; MARCO, P. de; LOWENBERG NETO, P.; FERRO, V. G.; SANTOS, A. J. Biodiversity conservation gaps in the Brazilian protected areas. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-9, ago. 2017.

PALACE, M. W.; SULLIVAN, F. B.; DUCEY, M. J.; TREUHAFT, R. N.; HERRICK, C.; SHIMBO, J. Z.; SILVA, J. M. e. Estimating forest structure in a tropical forest using field measurements, a synthetic model and discrete return lidar data. **Remote Sensing of Environment**, v. 161, p. 1-11, maio 2015.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing** Vienna, Austria, 2018.

RODRIGUES, T. E.; SILVA, J. M. L. da; CORDEIRO, D. G.; A. GOMES, T. C. de A.; CARDOSO JÚNIOR, E. Q. **Caracterização e classificação dos solos do campo experimental da Embrapa Acre, Rio Branco, Estado do Acre**. Belém: Embrapa, 2001. (Embrapa Amazônia Oriental, Série Documentos, n. 122).

ROUSSEL, J.R.; AUTY, D. **lidR: airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications**, 2018.

SILVA, A. G. P.; GÖRGENS, E. B.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; RODRIGUEZ, L. C. E. Assessing biomass based on canopy height profiles using airborne laser scanning data in eucalypt plantations. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 6, p. 504-512, nov./dez. 2015.

SILVA, C. A.; HUDAK, A. T.; VIERLING, L. A.; LOUDERMILK, E. L.; BRIEN, J. J.; HIERS, J. K.; JACK, S. B.; BENECKE, C. G.; LEE, H.; FALKOWSKI, M. J.; KHOSRAVIPOUR, A. Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.)

- tree attributes from field and LiDAR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 554-573, out. 2016.
- SILVA, C. A.; SAATCHI, S.; GARCIA, M.; LABRIÈRE, N.; KLAUBERG, C.; FERRAZ, A.; MEYER, V.; JEFFERY, K. J.; ABERNETHY, K.; WHITE, L.; ZHAO, K.; HUDAK, A. T. Comparison of small- and large-footprint lidar characterization of tropical forest aboveground structure and biomass: a case study from central Gabon. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, p. 1-15, abr. 2018.
- STARK, S. C.; LEITOLD, V.; WU, J. L.; HUNTER, M. O.; CASTILHO, C. V. de; COSTA, F. R. C.; MCMAHON, S. M.; PARKER, G. G.; SHIMABUKURO, M. T.; TAKAKO, M.; LEFSKY, M. A.; KELLER, M.; ALVES, L. F.; SCHIETTI, J.; SHIMABUKURO, Y. E.; BRANDÃO, D. O.; WOODCOCK, T. K.; HIGUCHI, N.; CAMARGO, P. B. de; OLIVEIRA, R. C. de; SALESKA, S. R. Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area and light environment. **Ecology Letters**, Montpellier, 15, n. 12, p. 1406-1414, dez. 2012.
- STARK, S.C.; ENQUIST, B.J.; SALESKA, S.R.; LEITOLD, V.; SCHIETTI, J.; LONGO, M.; ALVES, L.A.; CAMARGO, P.B.; OLIVEIRA, R.C. Linking canopy leaf area and light environments with tree size distributions to explain Amazon forest demography. **Ecology Letters**, v.18, n.7, p. 636–645, 2015.
- SULLIVAN, F. B.; DUCEY, M. J.; ORWIG, D. A.; COOK, B.; PALACE, M. W. Comparison of lidar- and allometry-derived canopy height models in an eastern deciduous forest. **Forest Ecology and Management**, v. 406, n. p. 83-94, dez. 2017.
- TILLEY, B. K.; MUNN, I. A.; EVANS, D. L.; PARKER, R. C.; ROBERTS, S. D. Cost considerations of using LiDAR for timber inventory. In: THE 2004 ANNUAL SOUTHERN FOREST ECONOMICS WORKSHOP. **Anais...** 2005.
- TIPTON, E. Stratified sampling using cluster analysis: a sample selection strategy for improved generalizations from experiments. **Evaluation Review**, v. 37, n. 2, p. 109-139, abr. 2013.
- TORRESAN, C.; CORONA, P.; SCRINZI, G.; MARSAL, J. V. Using classification trees to predict forest structure types from LiDAR data. **Annals of Forest Research**, v. 59, n. 2, p. 281-298, maio 2016.
- TRIMBLE, G.; GEO, T. W. SCOP++ **Manual for Version 5.5 and higher**, 2014.

- TURNER, D. P.; COHEN, W. B.; KENNEDY, R. E.; FASSNACHT, K. S BRIGGS, J. M. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 70, n. 1, p. 52-68, out. 1999.
- VASTARANTA, M. **Forest mapping and monitoring using active 3D remote sensing**. 45 f. 2012. Dissertations Forestales 144 – Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki, Finlandia, 2012.
- WULDER, M. A.; WHITE, J. C.; NELSON, R. F.; NÆSSET, E.; ØRKA, H. O.; COOPS, N. C.; HILKER, T.; BATER, C. W.; GOBAKKEN, T. Lidar sampling for large-area forest characterization: a review. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 121, p. 196-209, jun. 2012.
- WULDER, M. A.; COOPS, N. C.; HUDAK, A. T.; MORSDORF, F.; NELSON, R.; NEWNHAM, G.; VASTARANTA, M. Status and prospects for LiDAR remote sensing of forested ecosystems. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. SUPPL.1, p. S1-S5, 2013.
- YU, X.; HYYPPÄ, J.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; VIITALA, R. Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 28-37, jan. 2011.

4. CONCLUSÃO GERAL

O aperfeiçoamento das técnicas de manejo de florestas tropicais com uso da geotecnologia é um caminho sem volta. A tecnologia está cada vez mais acessível e presente no dia-a-dia das pessoas, empresas e processos produtivos. Na Amazônia, esse desenvolvimento tecnológico é ainda mais relevante pela importância global que tem a maior floresta tropical do mundo e pela dificuldade de acesso à informação de qualidade.

Para fins de elaboração de planos de manejo sustentável na Amazônia, as técnicas de manejo de precisão favorecem que os projetos sejam mais adaptados às questões locais de cada UPA. Isso porque as informações de campo são coletadas com equipamentos de alta precisão e a realidade florestal passa a ser muito bem representada no ambiente computacional, onde são feitas as análises e planejamento da exploração.

O Lidar aerotransportado mostrou-se apto para caracterizar com alta riqueza de detalhes uma paisagem de floresta umbrófila aberta primária na Amazônia. Isso graças ao tipo de sensor, características do voo, tipo de floresta sobrevoada e técnicas de processamento e análise de dados.

A estratificação da vegetação com uso da altura média do dossel, obtida pelo ALS, refletiu na classificação da variação horizontal da estrutura da floresta. Com isso, foi possível otimizar o inventário diagnóstico, com a redução da intensidade amostral, sem prejuízo às estimativas populacionais, bem como a gerar informações relevantes para o planejamento da exploração como o modelo digital do terreno, rede de drenagem e densidade da vegetação no sub-bosque.

Por fim, independentemente de toda potencialidade atual de sensores, equipamentos, programas de computador e das futuras inovações da indústria 4.0, a coleta de dados de campo é, e sempre será, necessária quando lidamos com manejo e conservação de recursos naturais.

É inegável que as técnicas de precisão otimizam o trabalho de campo, mas não o substituem por completo, principalmente em atividades como a numeração sequencial das árvores com placa e a avaliação da qualidade de fuste.

A observação da floresta em campo e o conhecimento empírico proporcionado por esse contato com a natureza não podem ser digitalizados, precisam ser vivenciados.

Nesse sentido, o uso combinado de sensores e equipamentos que possam proporcionar a melhoria no processo de caracterização e percepção da floresta deve ser investigado mais a fundo. sob o propósito de assegurar a continuidade da biodiversidade da floresta, seus serviços ecossistêmicos e qualidade de vida das pessoas que vivem na área rural.