

LARA DOS SANTOS LOPES DA SILVA

**COMBINAÇÃO DE DADOS DE VARREDURA A LASER
AÉREA E TERRESTRE: ESTUDO DE CASO PARA UMA ÁREA
DE FLORESTA TROPICAL**



LARA DOS SANTOS LOPES DA SILVA

**COMBINAÇÃO DE DADOS DE VARREDURA A LASER
AÉREA E TERRESTRE: ESTUDO DE CASO PARA UMA ÁREA
DE FLORESTA TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

S586c Silva, Lara Dos Santos Lopes Da
COMBINAÇÃO DE DADOS DE VARREDURA A LASER
AÉREA E TERRESTRE: ESTUDO DE CASO PARA UMA ÁREA
DE FLORESTA TROPICAL / Lara Dos Santos Lopes Da Silva. --
Presidente Prudente, 2020
118 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli

1. LASER. 2. SVLA. 3. SVLT. 4. 3D. 5. Canopy Height Model. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Combinação de dados de varredura a laser aérea e terrestre: estudo de caso para uma área de floresta tropical

AUTORA: LARA DOS SANTOS LOPES DA SILVA

ORIENTADOR: ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ (PARTICIPAÇÃO VIA VIDEOCONFERÊNCIA)

Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA (PARTICIPAÇÃO VIA VIDEOCONFERÊNCIA)

Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

Presidente Prudente, 30 de junho de 2020

DEDICATÓRIA

*À minha mãe Maria Zeneide, minha irmã Lorena,
meu pai Mário Sérgio (in memorian), e minha
melhor amiga Camila Batista (in memorian).*

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de fomento durante o desenvolvimento da pesquisa.

À empresa Engemap Geoinformação, pelo fornecimento dos dados provenientes de um Sistema de Varredura *LASER* Aéreo.

À equipe do Instituto de Pesquisa Geoespacial da Finlândia, pelo fornecimento dos dados provenientes de um Sistema de Varredura *LASER* Terrestre.

Aos membros da Equipe de Fotogrametria do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), pelos dados obtidos durante as missões na área de estudo.

Ao Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela orientação, e por todo ensinamento compartilhado durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos do PPGCC: Marcela, Lucas, Rorai, Érika, e Guilherme pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa, incentivo, empatia, e principalmente pela amizade.

À psicóloga Giovanna Braga Schmitz, pelo apoio emocional, e pelo comprometimento profissional.

À minha família, por rezar por mim, por me apoiar em meus objetivos, por fornecer todo suporte emocional e financeiro durante as fases mais importantes de minha vida, e ser minha fonte de força.

Aos meus amigos, em especial, Léslie, Clediane, Ana Carolina, Allysiê, Daniela, Riene, Alana, Luana, Jéssica, Allan, Victor, e Rodrigo por me incentivarem a finalizar esta trajetória, pelo apoio, pela empatia, e amizade, trazendo leveza aos meus dias.

Ao meu namorado, Daniel, pelo amor, pelo apoio durante o desenvolvimento da dissertação, e por todo incentivo.

À banca examinadora, Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz e Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita, pelas sugestões para o exame de qualificação, e para a dissertação de mestrado.

À UNESP, pela infraestrutura, e aos funcionários do Departamento de Cartografia, que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os avanços tecnológicos têm proporcionado novas técnicas de mapeamento. Uma técnica que vem sendo aplicada amplamente é a varredura a *LASER*, que utiliza o tempo de retorno de um pulso *LASER* emitido para determinar a distância entre objeto e emissor, técnica conhecida como *LiDAR*. A principal vantagem ao se utilizar esta tecnologia é a obtenção direta de coordenadas 3D de pontos no espaço objeto quando integrada a outros componentes. Os componentes integrados podem ser: Sistema Inercial (IMU), Sistema de Posicionamento (GNSS), e Sistema de Varredura. Em áreas de vegetação, os Sistemas de Varredura a *LASER* são vantajosos devido à penetração dos pulsos na folhagem e a otimização do tempo para se obter dados que possam ser utilizados para a extração das variáveis dendrométricas. Os pulsos provenientes de um Sistema de Varredura a *LASER* Aerotransportado (SVLA) podem não chegar ao nível do terreno, ou no caso de vegetação, há dificuldade de atingir os troncos das árvores, principalmente em regiões de florestas densas, como uma floresta tropical, por exemplo. Por outro lado, um Sistema de Varredura a *LASER* Terrestre (SVLT) é capaz de registrar os elementos que não são representados usando o SVLA. O projeto em questão atuou no processamento de dados provenientes de um mapeamento aéreo de uma reserva de floresta tropical realizado por um SVLA, e dados de um mapeamento de uma porção da área da reserva através de um SVLT, de forma a produzir modelos digitais de terreno (MDT), modelos de altura de copa (CHM), e modelos resultantes da integração dos dados obtidos pelo SVLA e SVLT. A integração dos dados SVLA e SVLT foi realizada através dos referenciamentos planimétrico e altimétrico dos dados SVLT para o mesmo sistema de referência dos dados SVLA e posterior fusão de ambos os dados. Através de um modelo fusionado e de um CHM foi possível extrair algumas variáveis dendrométricas: altura das árvores (H), diâmetro de copa (DC), diâmetro à altura do peito (DAP), e área da copa (AC). Foram gerados MDTs com dados de SVLA para alturas de voo de 900 m e 2000 m, apresentando, respectivamente, acurácia de 16 cm e 17 cm, a um nível de confiança de 95%. A acurácia para a variável DAP extraída do modelo fusionado foi de aproximadamente 6 cm, enquanto a acurácia para a variável DC validada através de um modelo de regressão foi de aproximadamente 5 cm. A partir deste estudo foi possível analisar que os dados SVLA e SVLT se complementam e possibilitam a extração das informações de terreno e da vegetação para uma área de floresta tropical de maneira eficaz e precisa.

Palavras – chave: LASER, SVLA, SVLT, 3D, *Canopy Height Model*, Nuvem de pontos.

ABSTRACT

Technological advances have provided new mapping techniques. A technique that has been widely applied is the LASER scanning, which uses the return time of a LASER pulse emitted to determine the distance between object and emitter, a technique known as LiDAR. The main advantage when using this technology is to obtain 3D coordinates directly from points in the object space with other integrated components. The integrated components can be: Inertial System (IMU), Positioning System (GNSS), and Scanning System. In vegetation areas, LASER Scanning Systems are advantageous due to the penetration of the pulses in the canopy and the optimization of time to obtain data that can be used for the extraction of dendrometric variables. The pulses from an Airborne LASER Scanning System (SVLA) may not reach the ground level, or in the case of vegetation, it is difficult to reach the tree trunks, especially in regions of dense forests, such as a tropical forest, for example. On the other hand, a Terrestrial LASER Scanning System (SVLT) is capable of registering the elements that are not represented using the SVLA. The project in question acted in the processing of data from an aerial mapping of a tropical forest reserve carried out by an SVLA, and data from a mapping of a portion of the reserve area through an SVLT, in order to produce digital terrain models (MDT), canopy height models (CHM), and models resulting from the integration of data obtained by SVLA and SVLT. The integration of SVLA and SVLT data was performed through the planimetric and altimetric registration of SVLT data for the same reference system of SVLA data and subsequent merging of both data. Through a fused model and a CHM it was possible to extract some dendrometric variables: height of the trees (H), crown diameter (DC), diameter at breast height (DBH), and crown area (AC). MDTs with SVLA data were generated for flight heights of 900 m and 2000 m, presenting accuracy of 16 cm and 17 cm, respectively, at a 95% confidence level. The accuracy for the DBH variable extracted from the fused model was approximately 6 cm, while the accuracy for the DC variable validated through a regression model was approximately 5 cm. Based on this study, it was possible to analyze that the SVLA and SVLT data complement each other and make it possible to extract terrain and vegetation information for an area of tropical forest in an efficient and accurate manner.

Key Words: LASER, SVLA, SVLT, 3D, Canopy Height Model, Point Cloud.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Scanner baseado no princípio da triangulação.	20
Figura 2 – Princípio da diferença de fase.	21
Figura 3 – Princípio do tempo de retorno do pulso LASER.	22
Figura 4 – Método espacial com função <i>scalar field</i> ativada.	25
Figura 5 – Sistemas referenciais envolvidos em um SVLA.	27
Figura 6 – Conceitos de Filtros.	33
Figura 7 – Princípio do Método de Filtragem ATIN	36
Figura 8 – Mecânica do filtro original de declividade local máxima.	37
Figura 9 – Etapas para integração de nuvens de pontos 3D.	43
Figura 10 – Mapa de Localização da Reserva Ponte Branca - SP.	50
Figura 11 – Mapa de Localização do PLOT 6 - Reserva Ponte Branca, SP.	51
Figura 12– a). SVLT <i>Scanner Leica ScanStation P40</i> . b). Método de medição por tempo de retorno do pulso LASER combinado com análise de diferença de fase.	52
Figura 13 – a). LASER RIEGL LMS-Q 680i. b). Sinais dos ecos resultando de diferentes tipos de alvos.	54
Figura 14 – GNSS/Inercial Applanix POS-AV 510.	55
Figura 15 – Nuvem de pontos terrestre original SW1 (SVLT).	55
Figura 16– Exemplo de uma nuvem de pontos aérea original (SVLA).	56
Figura 17 – Fluxograma do processamento dos dados SVLT.	59
Figura 18 – Fluxograma dos processamentos para se obter o MDT (SVLA).	61
Figura 19 – Fluxograma dos processamentos para se obter o CHM.	62
Figura 20 – Fluxograma do referenciamento planimétrico dos dados SVLT (transformação isogonal).	64
Figura 21 – Fluxograma do referenciamento planimétrico dos dados SVLT (transformação de corpo rígido).	65
Figura 22 – Referenciamento altimétrico e fusão das nuvens.	66
Figura 23 – Posicionamento do <i>scanner</i> para as 27 estações.	70
Figura 24 – Esfera e identificação de espécie de árvore em nuvem terrestre.	71
Figura 25 – Comparação de tronco da nuvem terrestre SW1 após a subamostragem.	73
Figura 26 – Nuvem terrestre total - nível 8.	74
Figura 27 – Feições das nuvens de pontos terrestre.	75
Figura 28 – Classificação da nuvem terrestre.	76

Figura 29 – Pontos de terreno da nuvem terrestre.	76
Figura 30 – Área total do voo a 2000 m.	78
Figura 31 – Área total do voo a 900 m.	78
Figura 32 – Visualização 3D do recorte dos dados SVLA (900 m).	79
Figura 33 – Visualização 3D do recorte dos dados SVLA (2000 m).	80
Figura 34 – Pontos de terreno nos dados SVLA (900 m).	81
Figura 35 – Pontos de terreno nos dados SVLA (900 m) e pontos de apoio.	82
Figura 36 – MDT da reserva Ponte Branca (900m).	85
Figura 37 – MDT da área de estudo – PLOT 6 (900m).	85
Figura 38 – CHM – Reserva Ponte Branca (900m).	88
Figura 39 – CHM – Área de estudo - PLOT 6 (900m).	89
Figura 40 – Pontos de controle nos dados SVLT (vista aérea).	91
Figura 41 – Comparação da nuvem terrestre transformada (isogonal) com a nuvem aérea (900 m).	93
Figura 42 – Comparação da nuvem terrestre transformada (isogonal) com a nuvem aérea (2000 m).	93
Figura 43 – Comparação de uma árvore da nuvem terrestre transformada (isogonal) com a nuvem aérea (900 m).	94
Figura 44 – Comparação de uma árvore da nuvem terrestre transformada (isogonal) com a nuvem aérea (2000 m).	94
Figura 45 – Gráfico dos resíduos na transformação de corpo rígido nos eixos x e y para os 6 pontos	96
Figura 46 – Gráfico dos resíduos na transformação de corpo rígido nos eixos x e y para 5 pontos	98
Figura 47 – Referenciamento da nuvem terrestre total subamostrada com a nuvem aérea (900 m).	99
Figura 48 – Referenciamento da nuvem terrestre total subamostrada com a nuvem aérea (2000 m).	99
Figura 49 – Comparação de uma árvore da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (900 m).	100
Figura 50 – Sobreposição de uma seção horizontal da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (900 m).	100
Figura 51 – Comparação de seção 1 da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (900 m).	101

Figura 52 – Comparação de seção 2 da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (900 m).	102
Figura 53 – Comparação de seção 3 da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (2000 m).	103
Figura 54 – Árvores de referência localizadas na nuvem aérea (900 m).	105
Figura 55 – Árvores de referência localizadas nos dados SVLT.	105
Figura 56 – Gráfico de dispersão dos dados de DC e DAP.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do Produto <i>Scanner Leica ScanStation P40</i>	52
Tabela 2 – Quantidade de pontos (Nuvens Terrestres).....	72
Tabela 3 – Coordenadas dos pontos de apoio.....	82
Tabela 4 – Elevações obtidas e diferença calculada (Voo 900 m).	83
Tabela 5 – Elevações obtidas e diferença calculada (Voo 2000 m).	83
Tabela 6 – Controle de qualidade do MDT – 8 Pontos (Voo 900 m).....	86
Tabela 7 – Controle de qualidade do MDT – 8 Pontos (Voo 2000 m).....	86
Tabela 8 – Coordenadas planimétricas dos pontos de referência para cálculo das transformações.....	90
Tabela 9 – Resíduos dos pontos de controle da transformação isogonal.	91
Tabela 10 – Parâmetros calculados da transformação isogonal.	92
Tabela 11 – Resíduos dos pontos de controle da transformação de corpo rígido (6 pontos). ..	96
Tabela 12 – Resíduos dos pontos de controle da transformação de corpo rígido (5 Pontos)..	97
Tabela 13 – Coordenadas das árvores de referência e DAP medido em campo.	104
Tabela 14 – Coordenadas locais das árvores de referência para comparação das variáveis nos dados SVLT.....	105
Tabela 15 – Alturas das árvores selecionadas.	106
Tabela 16 – Variáveis dendrométricas extraídas e calculadas.	107
Tabela 17 – Discrepâncias entre DAPs medidos em campo e DAPs medido na nuvem.	107
Tabela 18 – Coeficientes do modelo de regressão.	108
Tabela 19 – Estatísticas do modelo de regressão para estimar DC.	108
Tabela 20 – Comparação entre DC medido na nuvem de pontos (N) e DC estimado (E) através do modelo de regressão para árvores da mata atlântica (Leão et al., 2017).....	108

SIGLAS

AC – Área da Copa

AKA – *Academy of Finland*

ALS – *AirboneAirborne LASER Scanner*

ASPRS – *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

ATIN – *Adaptive TIN*

CCD – *Charge Coupled Device*

CHM – *Canopy Height Model*

DAP – Diâmetro à Altura do Peito

DBH – *Diameter at Breast Height*

DC – Diâmetro da copa

DGPS – *Differential Global Positioning System*

EDM – *Electronic Distance Measuring*

ENGEMAP – Engenharia Especializada em Geotecnologia

FAPESP – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

FGI – *Finnish Geospatial Research Institute*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System*

IDW – *Inverse Distance Weighted*

IMU – *Inertial Measurement Unit*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission Of Radiation*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

MTA – *Multi-time-around*

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RGB – *Red Green Blue*

SVLA – Sistema de Varredura a LASER Aerotransportado

SVLT – Sistema de Varredura a LASER Aerotransportado

TIN – *Triangulated Irregular Network*

TLS – *Terrestrial LASER Scanner*

WFD – *Waveform Digitizing*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivo Geral	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Histórico	18
2.2	Princípio do SVLT.....	19
2.3	Processamento dos dados SVLT	22
2.3.1	Referenciamento dos dados SVLT para um único sistema de coordenadas 3D	22
2.3.2	Subamostragem dos dados SVLT.....	23
2.4	Princípio do SVLA	25
2.5	Processamento dos dados SVLA.....	29
2.5.1	Classificação dos dados SVLA.....	31
2.5.2	Geração de Modelos Digitais de Terreno	34
2.5.3	Controle de Qualidade do MDT	40
2.5.4	Geração de Modelo de Dossel (CHM - <i>Canopy Height Model</i>)	41
2.6	Integração dos dados SVLA e SVLT	42
3	MATERIAIS	49
3.1	Área de Estudo.....	49
3.2	Equipamentos	51
3.2.1	Sistema de Varredura <i>LASER</i> Terrestre.....	51
3.2.2	Sistema de Varredura <i>LASER</i> Aéreo	53
3.3	Dados SVLT	55
3.4	Dados SVLA.....	56
4.	DESENVOLVIMENTO.....	57
4.1	Processamento dos Dados SVLT	57
4.2.1	Geração do Modelo Digital de Terreno (MDT)	59
4.2.2	Geração do Modelo de Altura de Dossel (CHM)	61
4.3	Integração dos Dados SVLA e SVLT	62
4.3.1	Referenciamento Planimétrico (2D).....	63
4.3.2	Referenciamento Altimétrico (1D).....	65
4.4	Extração das Variáveis Dendrométricas.....	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69

5.1 Processamento dos Dados SVLT	69
5.1.1 Referenciamento dos dados SVLT	69
5.1.2 Subamostragem dos Dados SVLT.....	71
5.1.3 Filtragem dos Dados SVLT	74
5.2 Processamento dos Dados SVLA.....	77
5.2.1 Filtragem dos Dados SVLA	77
5.2.2 Controle de Qualidade das Nuvens Aéreas	81
5.2.3 Geração do MDT	84
5.2.4 Geração do CHM.....	87
5.3 Referenciamento dos Dados SVLT com os Dados SVLA	89
5.3.1 Resultados da aplicação da transformação Isogonal 2D	90
5.3.2 Resultados da aplicação da transformação de Corpo Rígido 2D.....	95
6 CONCLUSÃO.....	110
REFERÊNCIAS.....	113

1 INTRODUÇÃO

As mudanças na biodiversidade de uma floresta alteram de forma relevante o meio ambiente, e como meio de conservação dos recursos naturais, estudos vêm sendo elaborados para a aplicação de novas tecnologias para o monitoramento destes recursos.

A representação digital do terreno é uma ferramenta importante para estudos florestais ou de recursos naturais. Os dados geomorfológicos vêm sendo obtidos há anos através de levantamentos topográficos, porém, em áreas extensas e de difícil acesso, como florestas densas, por exemplo, a aquisição de dados torna-se um desafio. Os métodos fotogramétricos também são uma opção para aquisição de dados de mapeamento, porém em áreas de vegetação densa, apresentam problemas para obter os dados referentes ao terreno devido à oclusão pela vegetação (CĂȚEANU e ARCADIE, 2017).

Uma tecnologia que vem sendo empregada em florestas e apresenta ótimos resultados em termos de precisão e densidade de dados é a Varredura a *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), que utiliza o princípio LiDAR (*Light Detection and Ranging*), no qual a distância entre o receptor e o objeto no terreno é determinada pela medida do tempo de resposta de um pulso *LASER* emitido (SHAN e TOTH, 2008).

A principal vantagem do princípio LiDAR é a obtenção direta de coordenadas 3D de pontos no espaço objeto, quando integrado a outros sistemas como o Sistema Inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*), um Sistema de Posicionamento (GNSS – *Global Navigation Satellite System*), e um Sistema de Varredura. Quando todos esses sistemas são acoplados à uma plataforma móvel, como uma aeronave, compõem um Sistema de Varredura a *LASER* Aerotransportado (SVLA), ou *Airbone LASER Scanner* (ALS). Quando o sistema de varredura é estático e fixo, trata-se de um Sistema de Varredura a *LASER* Terrestre (SVLT), ou *Terrestrial LASER Scanner* (TLS).

Uma vantagem importante dos sistemas de varredura a *LASER* pode ser a penetração dos pulsos emitidos em áreas de vegetação. No caso do SVLA, os pulsos *LASER* podem atravessar trechos das copas das árvores onde não há uma cobertura da folhagem completamente fechada e, assim, podem atingir o solo ou camadas intermediárias de vegetação. Isto permite a obtenção de informações do terreno através do processamento dos dados e geração de um modelo digital de terreno (MDT) (CĂȚEANU e ARCADIE, 2017). Os dados obtidos através dos sistemas SVLA e SVLT são valiosos para a realização de inventários florestais, quantificação de biomassa, e estoques de carbono, por exemplo.

O SVLT, por outro lado, coleta dados que, após serem processados, permitem a geração de nuvens de pontos que podem fornecer alto detalhamento do terreno. Este detalhamento é possível devido ao fato de alguns SVLTs serem munidos de *Scanners* panorâmicos, que têm um campo de varredura horizontal de 360° e ângulo de abertura vertical de aproximadamente 80-90 °. Este tipo de varredura permite a geração de um campo de visão que é limitado apenas por auto-oclusões do próprio instrumento e seu tripé (VOSSSELMAN e MAAS, 2010).

A área de floresta nativa utilizada na realização desse estudo está localizada na reserva da Ponte Branca - SP, e é uma região de vegetação densa de floresta tropical, sendo indispensável a utilização de um SVLA para a obtenção de informações do dossel e do solo. Para conferir um maior detalhamento da área, utiliza-se também de um SVLT, que, por ser estático e terrestre, fornece maior densidade de pontos e alta precisão de dados sob o dossel, complementando os pontos coletados pelo SVLA, que não fornecem a mesma densidade de pontos em relação aos troncos das árvores e solo, porém, fornecem a cobertura aérea das copas das árvores.

Obter informações para compor um inventário florestal de uma floresta tropical se torna desafiante devido à densidade da floresta nativa (Hansen et al., 2015). No intuito de se obter toda a estrutura da floresta tropical e extrair as variáveis dendrométricas das árvores, este projeto tem como motivação combinar os dados adquiridos através de um SVLA e um SVLT de forma que estes dados sejam complementares e retornem toda a estrutura florestal localizada na área de estudo.

A combinação dos dados pós processados obtidos pelos dois sistemas resultará em uma nuvem de pontos tridimensional da estrutura florestal (modelo 3D), que representará uma área parcial de uma reserva de floresta tropical. A partir do modelo 3D será possível extrair as variáveis dendrométricas das árvores, em florestas tropicais. Os dados SVLA e SVLT também serão processados para gerar produtos como: modelo digital de terreno (MDT) e modelo de altura de dossel (CHM – *Canopy Height Model*).

1.1 Justificativa

A aplicação de sistemas de varredura a *LASER* aéreo vem sendo realizada para florestas tropicais da Amazônia, com o objetivo de se detectar as árvores individualmente, e, através dos dados *LASER*, extrair as variáveis dendrométricas das árvores para compor um inventário florestal. O desafio para detectar as árvores individualmente em florestas tropicais

ocorre devido à oclusão das árvores mais baixas, ocasionada pelas árvores mais altas, além da heterogeneidade das formações florestais, impossibilitando que algoritmos de detecção de árvores sejam eficazes. Assim, métodos robustos que façam a extração da copa e dos troncos podem ser uma solução para se obter uma melhor detecção das árvores (MILLIKAN, P. H. K.; SILVA, C. A; RODRIGUEZ, L. C. E., 2019). Para se obter uma melhor detecção das árvores individualmente propõe-se o método de fusão dos dados SVLA e SVLT, de forma que seja possível extrair variáveis dendrométricas (diâmetro a altura do peito, diâmetro da copa, altura das árvores) através das copas (extraídas dos dados SVLA) e dos troncos (extraídos dos dados SVLT).

A aplicação integrada de sistemas de varredura a *LASER* aéreo e terrestre vem sendo realizada em diversas áreas de estudos, inclusive em áreas de vegetação. Porém, as metodologias elaboradas que apresentam melhores resultados oriundos de dados *LASER* são para florestas consideravelmente abertas e menos densas, ou seja, florestas boreal e sub-boreal. Segundo Hansen et al. (2015), a máxima densidade de biomassa em seus estudos de florestas boreal e sub-boreal é de aproximadamente $500 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, enquanto a densidade de biomassa em florestas tropicais pode ser muito maior.

Para obter dados referentes a uma área de Mata Atlântica, foi estabelecida uma parceria entre o Departamento de Cartografia da FCT-UNESP e o *Finnish Geospatial Research Institute* (FGI). Dados *LASER* de uma reserva florestal composta por floresta tropical (Ponte Branca) foram obtidos, de forma independente, com o um SVLA e um SVLT. Os dados obtidos pelo SVLA foram coletados através de dois voos realizados pela equipe da empresa Engemap Geoinformação e os dados obtidos pelo SVLT foram coletados através de uma campanha realizada por pesquisadores finlandeses do FGI.

Esta dissertação de mestrado envolverá a combinação dos dados aéreos e terrestres pós processados, com enfoque na aplicação da tecnologia a áreas de florestas tropicais, de forma que se obtenha produtos como: Modelo Digital de Terreno, Modelo de Altura do Dossel (CHM - *Canopy Height Model*), um modelo tridimensional da estrutura florestal (3D), resultante da Fusão dos dados SVLA e SVLT. Também, foram obtidas as variáveis dendrométricas (diâmetro à altura do peito (DAP), diâmetro da copa (DC), e altura das árvores) das árvores principais, as quais foram extraídas a partir do modelo 3D resultante.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de metodologias para a extração de elementos da estrutura de uma parcela de florestal tropical, empregando a integração de dados LASER provenientes de sistemas de varredura aéreo (SVLA) e terrestre (SVLT).

Como objetivos específicos têm-se:

- Estudar e avaliar as técnicas para geração de Modelo Digital de Terreno (MDT) através da filtragem dos dados *LASER* e a geração de um Modelo de altura do Dossel ou *Canopy Height Model* (CHM).
- Estudar e avaliar a técnica para a geração de nuvem de pontos tridimensional da estrutura florestal (modelos 3D) empregando a fusão dos dados SVLA e SVLT pós processados;
- Extrair e avaliar as variáveis dendrométricas das árvores principais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

LASER é um acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance*, ou seja, amplificação da luz por emissão estimulada de radiação. O feixe de raios *LASER* é monocromático e apresenta um comprimento de onda específico, coerente e colimado. Os dispositivos *LASER* para medição de distâncias utilizam como base o princípio LiDAR, acrônimo para *Light Detection and Ranging*, em que a distância do sistema ao terreno é determinada pela medida do tempo de retorno de um pulso *LASER* emitido (SHAN e TOTH, 2008).

O *LASER* é uma tecnologia avançada que apresenta como principal vantagem a obtenção direta de coordenadas 3D de pontos na superfície de objetos, quando integrado a outros componentes. Isoladamente, esta tecnologia fornece apenas a medida de distância entre o sistema e o objeto, oferecendo uma acurácia a nível de milímetros. Ao ser integrado a um sistema de varredura e a uma unidade de determinação de posição e atitude do sistema, esta tecnologia permite a determinação de coordenadas 3D de vários pontos sequencialmente, gerando as nuvens de pontos tridimensionais que representarão a estrutura escaneada. Utilizando o *LASER* e outros componentes que formam um sistema de varredura a *LASER*, é possível obter uma nuvem de pontos georreferenciada, e assim utilizar esta nuvem de pontos para as mais diversas aplicações (SHAN e TOTH, 2008).

Segundo Shan e Toth (2008), os *LASERS* começaram a ser utilizados na área de levantamento topográfico por volta do fim da década de 60. As medições eram realizadas através de instrumentos que utilizavam métodos baseados na diferença de fase ou nas técnicas por tempo de retorno do pulso *LASER*. Na área militar o *LASER* foi utilizado para aplicações como artilharia e rastreamento. A partir da década de 70, os dispositivos *LASER* começaram a substituir as lâmpadas de vapor que eram usadas como tipos de instrumentos de medição eletrônica de distância (EDM - *Electronic Distance Measuring*). O levantamento de pontos de controle ou redes geodésicas era realizado através de medições de direções e/ou distâncias utilizando métodos como triangulação, trilateração ou poligonação, através dos equipamentos EDM. Os ângulos eram medidos de forma separada utilizando os teodolitos.

Posteriormente, os dois equipamentos foram fundidos com a tecnologia baseada no *LASER* e as atualizações foram incorporadas às estações totais. Apesar das estações totais

garantirem uma taqueometria eletrônica precisa, atualizações e novos estudos foram realizados, de forma que os mecanismos de escaneamento foram adicionados aos equipamentos *LASER*. Assim, após uma série de desenvolvimentos e melhoramentos nos equipamentos, obteve-se os instrumentos *LASER* de escaneamento terrestre e aéreo, os quais são utilizados para aplicações de mapeamento topográfico, seja na forma estática posicionados em tripés, ou de forma móvel quando acoplados em plataformas dinâmicas (SHAN e TOTH, 2008).

Segundo Vosselman e Maas (2010), no início da década de 70, verificou-se que sistemas *LASER* aerotransportados eram capazes de medir distâncias entre o sensor *LASER* e os alvos localizados no terreno com um erro menor que 1 m. Entretanto, o sistema *LASER* não teve um uso abrangente no mapeamento topográfico preciso devido a dois problemas: (1) para realizar um mapeamento preciso é necessário conhecer a altitude da aeronave a um nível de precisão comparável à capacidade de medição do sistema *LASER* e (2) o segundo problema refere-se a determinação da posição planimétrica do local iluminado no terreno (*LASER Footprint*). Embora o segundo problema seja menos complicado que o primeiro, os meios para determinar estes dados para áreas extensas, e que oferecessem qualidade suficiente, não estavam disponíveis na época.

No final da década de 80, com a disponibilidade da tecnologia GPS (*Global Positioning System*), um novo método (GPS Diferencial) foi desenvolvido permitindo o registro de posição para áreas extensas. Com a introdução do GPS diferencial (DGPS), a posição tridimensional do *Scanner* com precisão sub-decimétrica do *Scanner* pôde ser determinada em forma de coordenadas horizontais e vertical (KRABILL e FRIESS, 1989). Através do filtro de Kalman e o uso de IMUs, em conjunto com a tecnologia DGPS, foi possível determinar tanto a posição quanto a atitude e, por conseguinte, as coordenadas tridimensionais de pontos, no modo dinâmico. No início da década de 90, a exatidão para dados atingia ± 10 cm em altitude, e ± 50 cm em posição horizontal (LINDENBERGER, 1989; SCHWARZ et al., 1994; ACKERMANN, 1994).

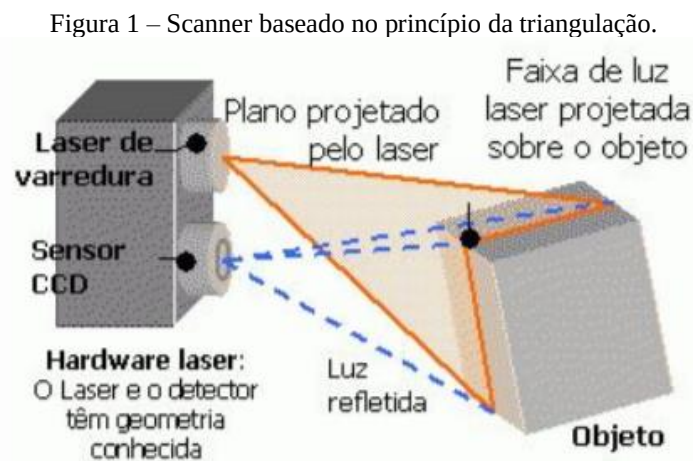
2.2 Princípio do SVLT

Todas as operações de medidas de distância do *LASER*, criação de perfis e varreduras, são baseadas nos pulsos *LASER* que podem medir distâncias entre o sensor e os objetos com alto nível de acurácia. Os métodos de medição de distância classificam os sistemas SVLT, e

são denominados por três princípios: triangulação, diferença de fase, ou tempo de retorno do pulso *LASER*.

Nos sistemas que usam o princípio da triangulação, um pulso *LASER* é emitido e a luz refletida pelo objeto é registrada por um ou mais sensores CCD's (*Charge Coupled Device*) de câmaras digitais. A geometria entre o *LASER* e o sensor CCD é conhecida e permite o cálculo das coordenadas tridimensionais dos pontos iluminados pelos feixes do *LASER* através do método da intersecção.

A precisão da reconstrução do modelo do objeto depende de elementos geométricos similares, como a relação base/distância. Este tipo de sistema é ideal para a reconstrução de objetos pequenos e a distância máxima de utilização dependerá da base empregada pelo scanner, como no método fotogramétrico (TOMMASELLI, 2003). Uma desvantagem do princípio da triangulação é a identificação do ponto *LASER* refletido pelo objeto e registrado pelo CCD, que pode ser limitada pela iluminação do ambiente e pela distância ao objeto (BARBER et al., 2001). Este princípio é apresentado na Figura 1.

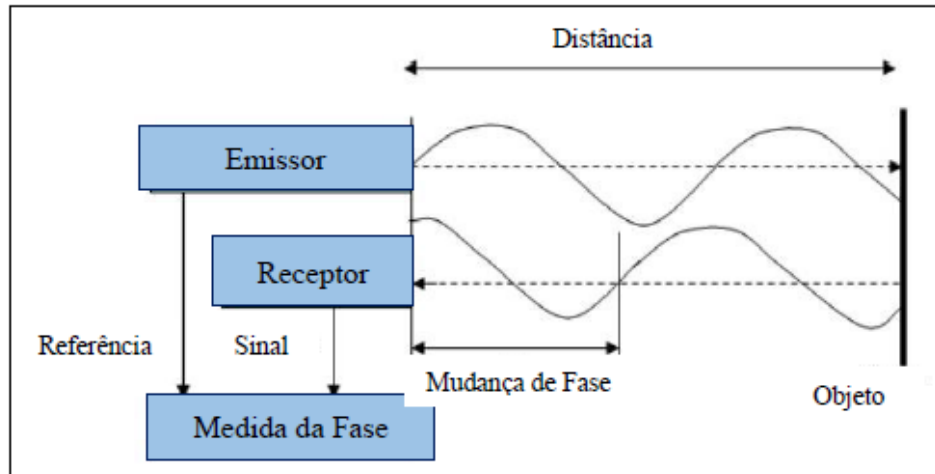


Fonte: Tommaselli (2003).

O segundo método de medição baseia-se no princípio de diferença de fase, o qual utiliza a modulação da energia do feixe *LASER*, ou seja, a luz emitida é modulada em amplitude e direcionada sobre uma superfície. A luz refletida é capturada por uma unidade de recepção, de forma que um circuito mede a diferença de fase entre as formas de ondas emitidas e recebidas. A diferença de fase, entre os pulsos transmitidos e refletidos, da parte fracionada do comprimento é menor do que o valor da parte total do comprimento da onda modulada. O intervalo de medição de distâncias era limitado ao máximo de 100 metros com precisão de medidas de distância que pode chegar a milímetros (FRÖHLICH;

METTENLEITER, 2004). Este princípio é apresentado na Figura 2. Atualmente existem *scanners* de fase que podem medir distâncias de até 3000 m como o scanner Riegl LMS-Q680i (RIEGL, 2012).

Figura 2 – Princípio da diferença de fase.



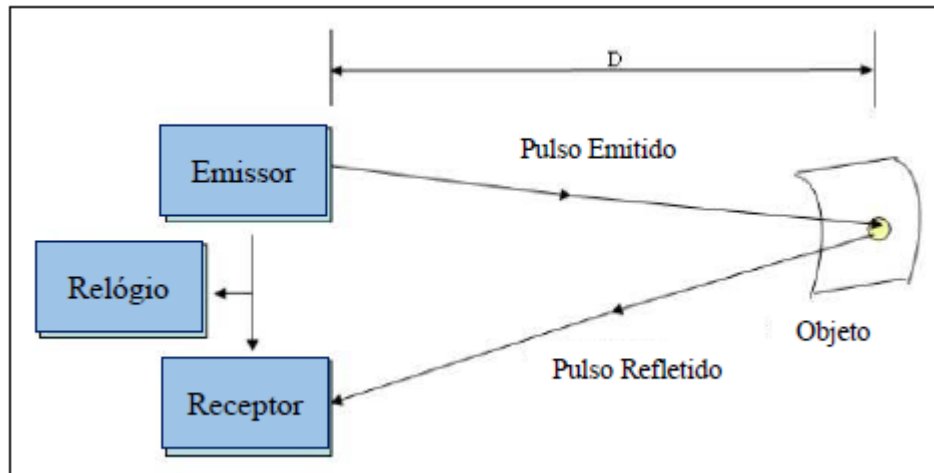
Fonte: Martins Neto (2016).

O terceiro tipo de técnica de medição é baseado no princípio do tempo de retorno do pulso *LASER* (*Time of Flight*), conhecido como *LiDAR*. É a técnica mais utilizada por sistemas SVLT, pois permite medições altamente precisas de curta a longa distâncias, até centenas de metros, por exemplo. A medição é baseada na equação geral da velocidade, que consiste na razão da distância pelo tempo. Neste caso, o pulso *LASER* é emitido pelo emissor e refletido pelo objeto, retornando para o receptor. Utilizando a velocidade da luz, e o tempo que o pulso levou desde sua emissão até seu retorno, pode-se calcular a distância do sistema de varredura ao objeto (D) (FRÖHLICH e METTENLEITER, 2004). Este tipo de princípio é apresentado na Figura 3.

Num sistema de varredura a *LASER*, o instrumento permite a emissão de milhares de pulsos *LASER* por segundo, normalmente de luz infravermelha. O instrumento mede as distâncias, a intensidade da energia refletida pelo objeto, azimuth e altitude do feixe, que definem coordenadas polares do ponto, em relação ao referencial do *LASER*. Então, através dos dados pode-se calcular as coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos medidos, assim como sua resposta espectral, que pode ser usada para gerar uma imagem de intensidade da energia refletida pelo objeto. Este sistema permite, teoricamente, a operação durante a noite, já que não necessita de luz visível. O resultado do processo de medição e processamento é uma nuvem de pontos, que poderia ser genericamente nomeada de Modelo

Numérico de Superfície, ao qual o valor de reflectância também pode ser associado (TOMMASELLI, 2003).

Figura 3 – Princípio do tempo de retorno do pulso LASER.



Fonte: Martins Neto (2016).

2.3 Processamento dos dados SVLT

Os dados obtidos do levantamento terrestre de uma floresta tropical por um SVLT geram nuvens de pontos 3D. As nuvens originais que contém milhares de pontos sobre os troncos, parte das copas das árvores, folhagem, e terreno, necessitam ser processadas de forma a eliminar ruídos e realizar a posterior classificação entre pontos que representam a vegetação (troncos e parte das copas) e os pontos que representam o terreno.

2.3.1 Referenciamento dos dados SVLT para um único sistema de coordenadas 3D

As nuvens de pontos são obtidas em sistemas de coordenadas locais e distintos. O referenciamento das nuvens de pontos terrestres é necessário para que os pontos obtidos pelo SVLT em diferentes posições e orientações, sejam transformados para um sistema de coordenadas único, para que então as nuvens sejam fusionadas. Posteriormente, a nuvem gerada pela fusão das nuvens obtidas pelo SVLT é referenciada ao mesmo sistema de referência das nuvens obtidas pelo SVLA, possibilitando a combinação dos dados. O primeiro passo para o referenciamento é a detecção de entidades geométricas comuns que sejam visíveis nas nuvens aéreas e terrestres.

O algoritmo mais conhecido de transformação entre nuvens de pontos (também chamada de registro) é o *Iterative Closest Point* (ICP), introduzido por Besl e McKay (1992). O algoritmo estima as rotações e translações entre duas nuvens de pontos usando uma técnica de minimização das distâncias ponto a ponto entre nuvens, usando a distância euclidiana mínima. Este algoritmo procura realizar o alinhamento de cada ponto na nuvem origem ao seu ponto correspondente na nuvem de referência. Também, podem ser usados critérios de ponderação e rejeição de *outliers* antes do alinhamento final (HE et al., 2017).

O método de detecção automática de esferas é outro método muito empregado para realizar a detecção de pontos para o referenciamento da nuvem de pontos. Estas esferas de controle têm características conhecidas, sendo posicionadas antes do levantamento em regiões adequadas na área comum entre as nuvens. Segundo Bienert e Maas (2009), para realizar a detecção automática de esferas, é necessário utilizar valores da imagem de intensidade, onde cada pixel representa a intensidade do pulso *LASER* retroespalhado. As coordenadas X, Y, Z, a intensidade (intervalo de valores: 0 a 255) e as coordenadas de pixel são usadas pelo algoritmo de detecção automática de esferas. O fluxo de trabalho é dividido em três partes. No primeiro passo, uma imagem de intensidade binária inversa é preparada por limiarização. No segundo passo, para eliminar pontos que não pertencem à superfície da esfera é executada uma operação de erosão. A última parte trata-se da pesquisa de *clusters*. Para esse propósito, um algoritmo de busca de *cluster* 2D modificado é usado, conforme Scheller e Schneider (2006) e Maas et al. (2008).

Quando pontos em comum não são encontrados utilizando o método de detecção das esferas, utiliza-se a detecção de outros objetos comuns, como troncos de árvores, através de métodos interativos (localização visual). Este referenciamento baseado em feições faz uso de feições naturais extraídas das nuvens, como pontos, arestas, planos ou cilindros, na nuvem de pontos (BIENERT e MAAS, 2009). Em qualquer caso é necessário que haja uma distribuição espacial adequada dos pontos comuns entre as nuvens.

2.3.2 Subamostragem dos dados SVLT

A subamostragem dos dados *LASER* é utilizada para reduzir a densidade das nuvens de pontos, porém, de forma que as características das feições sejam mantidas. Três exemplos de métodos utilizados para a subamostragem são: *Random*, *Space*, e *Octree-based*, ou seja, aleatório, espaço, e baseado em uma árvore de níveis de simplificação, onde cada ponto interno da árvore é originado por oito pontos. Para os três métodos, quando a nuvem de

entrada é selecionada para a realização da subamostragem, por um dos métodos, uma nova nuvem sub amostrada é gerada como resultado. A nuvem gerada é um sub conjunto da nuvem de entrada, ou seja, os pontos originais não são deslocados. Portanto, a nuvem resultante mantém as feições da nuvem inicial (escalas, cores, etc.). O *Software CloudCompare* oferece os três métodos para realizar a subamostragem de uma ou várias nuvens de pontos.

O método *Random* seleciona um número específico de pontos na nuvem de forma aleatória. O número de pontos pode ser configurado pelo usuário, ou seja, o método seleciona um ponto aleatório, identifica todos os pontos ao redor do ponto aleatório para serem removidos (exemplo: dentro de uma esfera – o raio é especificado pelo usuário). O método repete o processo até todos os pontos serem selecionados como aleatórios ou identificados e removidos. No método *Space*, o usuário deve configurar uma distância mínima entre dois pontos. O *software* selecionará os pontos da nuvem original, de modo que nenhum ponto na nuvem resultante esteja a uma distância de outro ponto maior do que o valor de distância especificado (quanto maior for este valor, menos pontos serão mantidos). Para esse método, além do usuário especificar um único valor, há a opção de ativar a função *scalar field*, a qual permite modular a distância da amostra através de valores do campo escalar (Figura 4). O termo *field*, ou campo, citado anteriormente, é uma função que possui um valor diferente em cada ponto no espaço. Um *scalar field*, ou campo escalar, é um campo para o qual existe um único número associado a cada ponto do espaço. Um exemplo é apresentado na Equação 1, onde a expressão define o valor da função escalar ϕ para cada ponto (x, y, z) no espaço. Há três possíveis formas de representar visualmente um campo escalar, definido pela Equação 1: mapas de curvas de nível, codificação por cores, e mapas de relevo (MIT, 2018). A Equação 1 pode ser utilizada para representar o campo escalar considerando as três condições citadas.

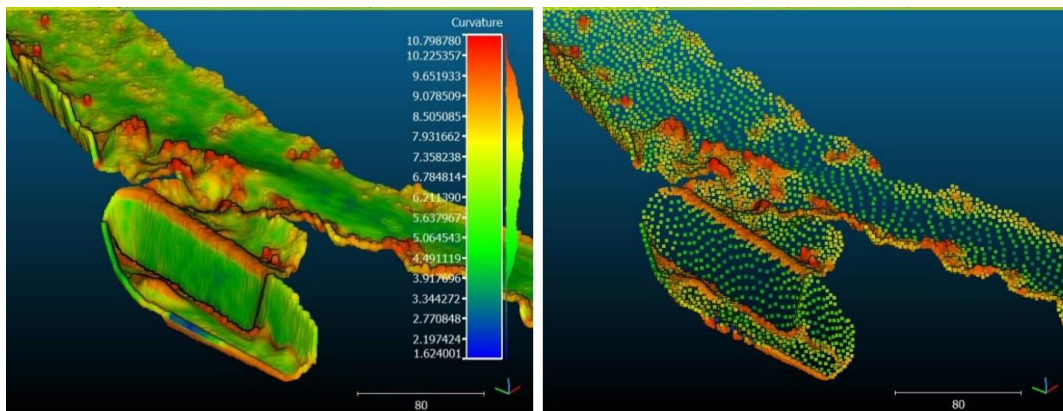
$$\phi(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + (y + d)^2 + z^2}} - \frac{1/3}{\sqrt{x^2 + (y - d)^2 + z^2}} \quad (1)$$

Onde: x, y, z são as coordenadas de um ponto na nuvem e d representa a distância entre o ponto e a origem considerada.

No método *Space*, ao utilizar a função *scalar field*, o usuário especifica a distância da amostra correspondente ao mínimo e máximo valores do campo escalar e o *software* interpola linearmente a distância espacial.

O método *Octree* permite a seleção dos níveis de subdivisão da árvore para as quais a nuvem será simplificada. Em cada célula da árvore, o ponto mais próximo do centro da célula da árvore é mantido. Quanto maior for o nível, menores serão as células (mais pontos serão mantidos). Ao usar o software *CloudCompare*, o nível máximo do método é 10 para a versão de 32 bits, e 21 para a versão de 64 bits (CLOUDCOMPARE, 2015).

Figura 4 – Método espacial com função *scalar field* ativada.



(Figura à esquerda: original. Figura à direita: sub amostrada).

Fonte: *CloudCompare* v2.6.1, 2015.

2.4 Princípio do SVLA

Os SVLAs são baseados em três sistemas: um sistema de varredura a *LASER*, que integra a unidade que mede a distância até o ponto do terreno iluminado pelo *LASER* e a unidade de varredura, e uma combinação do sistema GPS/GNSS com o sistema IMU, que medem respectivamente a posição e a orientação da plataforma. Shan e Toth (2008), afirmam que a integração GNSS/IMU é elemento essencial de um sistema *LASER* móvel, o qual não apresentaria eficácia sem estes sistemas. Sistemas ativos baseados na varredura a *LASER* não dependem da luz solar, ou seja, eles podem ser operados durante o dia ou à noite. Esta característica é uma vantagem considerável do SVLA comparado a outros métodos de levantamento de feições, como fotogrametria terrestre e levantamento utilizando estação total, por exemplo (VOSELMAN e MAAS, 2010).

Os componentes básicos de um SVLA são:

- Conjunto de varredura que compreende: *LASER*, mecânica de varredura, e óptica. O sistema *LASER* (principalmente um sistema de medição por tempo de retorno do

pulso), montado sobre a fuselagem da aeronave, envia continuamente pulsos *LASER* para o terreno conforme a aeronave realiza o voo. Dependendo da velocidade da aeronave e da altura do voo, o conjunto de varredura permite a obtenção de nuvens de pontos com até 50 pontos por metro quadrado. Conjuntos de varredura modernos fornecem uma compensação de rolagem para compensar este movimento de rotação da aeronave. Este recurso ajuda a evitar lacunas na cobertura, o que pode ocorrer entre faixas adjacentes devido a rolagem. A compensação de rolagem permite que a sobreposição entre as linhas de voo seja planejada de forma a ser menor, e portanto, resulta em uma vantagem econômica (VOSSELMAN e MAAS, 2010).

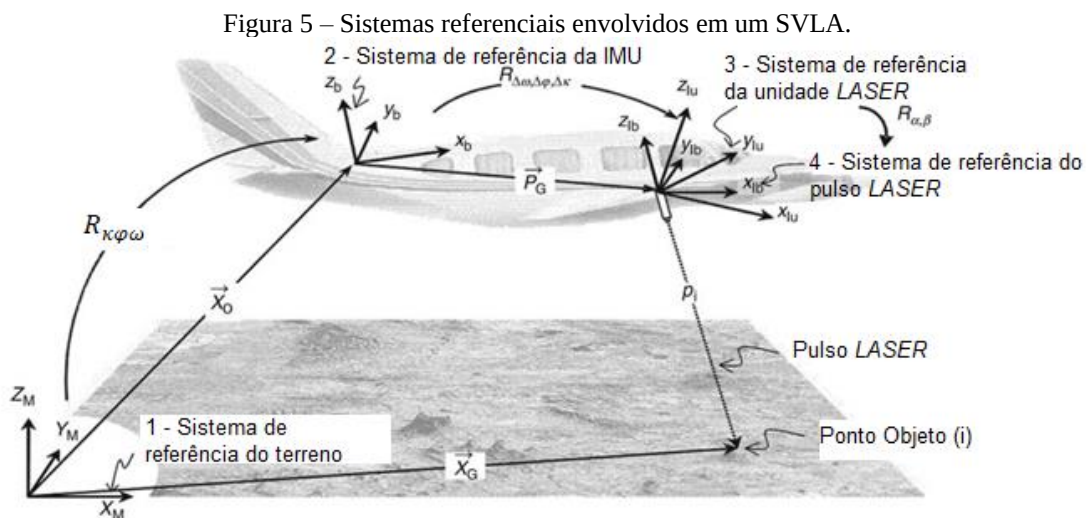
- Antena GPS/GNSS da aeronave: o padrão é uma antena de dupla frequência, a qual registra os sinais GPS/GNSS a uma taxa de amostragem de 2 Hz, porém pode-se utilizar taxas de amostragem maiores. A antena é montada em uma posição em que a mesma fique exposta no topo da aeronave, proporcionando uma visão sem obstrução para os satélites GPS/GNSS.

- IMU: a IMU pode ser fixada diretamente ao sensor de varredura *LASER* ou próxima a ele em uma plataforma de levantamento estável. É responsável pela gravação de dados das acelerações lineares e velocidade rotacional. Os dados de aceleração servem para apoiar a interpolação da posição da plataforma na trajetória do GPS/GNSS, enquanto as velocidades de rotação, em conjunto com as acelerações, são usadas para determinar a orientação da plataforma. A combinação dos dados do GPS/GNSS e dados da IMU resultam em um conjunto de dados de posição e atitude, chamados de “melhor trajetória suavizada”. Se a altitude e os dados de atitude foram interpolados para 800 Hz, a posição e a orientação estarão disponíveis em intervalos de aproximadamente 0,09 m (a uma velocidade da aeronave de 70 m/s). Usando o processamento comum de GPS/IMU, as coordenadas da plataforma podem ser estimadas com uma precisão de cerca de 10 cm. Um eventual erro sistemático, ainda incluído nesses dados, pode ser removido durante o processamento dos dados com procedimentos de ajuste de faixas a partir de dados de controle de campo (VOSSELMAN e MAAS, 2010).

- Unidade de controle e gravação de dados: este dispositivo é responsável pela sincronização de tempo e controle de todo o sistema. Também armazena dados de distância e posição obtidos pelo *LASER*, IMU e GPS/GNSS.

- Microcomputador do operador: este recurso serve como um meio de comunicação com a unidade de controle e gravação de dados, também para configurar parâmetros das missões, e para monitorar a performance do sistema durante o levantamento.
- Sistema de planejamento de voo: é um recurso que oferece um prévio planejamento das faixas de voo, de forma a oferecer um guia ao piloto que realizará o voo (VOSELMAN e MAAS, 2010).

O SVLA requer um receptor GNSS em terreno para ser utilizado como estação de referência no cálculo pelo método DGPS. Isto permite uma compensação dos efeitos atmosféricos que podem interferir na precisão dos dados de posicionamento. Como no Brasil existe a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), a qual é equipada com receptores GNSS, pode-se utilizar os dados das mesmas, dependendo da distância da aeronave até estação de referência. O SVLA também pode ser complementado por uma câmara óptica de porte médio, de forma que as imagens tomadas possam apoiar a interpretação dos dados nos casos em que há dificuldade de reconhecimento dos objetos nos dados SVLA obtidos usando apenas os dados LiDAR (VOSELMAN e MAAS, 2010). A Figura 5 apresenta os referenciais envolvidos em um levantamento realizado por um SVLA. O sistema da IMU está integrado ao sistema GNSS.



Fonte: Adaptado de Habib (2008).

A Equação 2, adaptada de Habib (2008), representa o relacionamento entre as medidas efetuadas pelo sistema de varredura e os demais parâmetros, e é denominada equação do LASER.

$$\vec{X}_G = \vec{X}_o + R_{\kappa\varphi\omega} \vec{P}_G + R_{\kappa\varphi\omega} R_{\Delta\omega\Delta\varphi\Delta\kappa} R_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde:

i: ponto a determinar no referencial do terreno, ou referencial geodésico;

$\vec{X}_G$: posição do ponto i no referencial geodésico;

$\vec{X}_o$: posição do centro de fase da antena GNSS, reduzida ao centro da IMU, no referencial geodésico;

$R_{\kappa\varphi\omega}$: matriz de rotação entre o sistema referencial da IMU e o sistema referencial geodésico;

$R_{\Delta\omega\Delta\varphi\Delta\kappa}$: matriz de rotação entre o sistema referencial da unidade *LASER* e o sistema referencial da IMU, também chamada de matriz de *boresight*;

$\vec{P}_G$: posição da origem do sistema referencial da unidade *LASER* no referencial da IMU (*lever-arm*);

$R_{\alpha\beta}$: matriz de rotação entre o sistema referencial da unidade *LASER* e do sistema referencial do dispositivo de emissão *LASER*;

ρi : distância entre o ponto de emissão do feixe e o alvo i;

A partir da Equação 2 tem-se:

$$R_{\kappa\varphi\omega} = R_Z(\kappa(t))R_Y(\varphi(t))R_X(\omega(t)) \quad (3)$$

$$R_{\Delta\omega\Delta\varphi\Delta\kappa} = R_Z(\Delta\kappa(t))R_Y(\Delta\varphi(t))R_X(\Delta\omega(t)) \quad (4)$$

$$R_{\alpha\beta} = R_Z(\alpha(t))R_Y(\beta(t)) \quad (5)$$

Onde:

$$R_Z(\kappa) = \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sen \kappa & 0 \\ -\sen \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R_Y(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sen \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sen \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$R_X(\omega) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sen \omega \\ 0 & -\sen \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \quad (8)$$

α, β : os ângulos de varredura do espelho;

κ, φ, ω : os ângulos de atitude obtidos no processamento GNSS/IMU;

$\Delta\kappa, \Delta\varphi, \Delta\omega$: os ângulos de não alinhamento medidos entre os sistemas da IMU e da unidade *LASER*.

2.5 Processamento dos dados SVLA

Os dados obtidos através do SVLA são nuvens de pontos com coordenadas tridimensionais e valores de intensidade do objeto refletido. Os dados provenientes do SVLA pós processados podem ser usados para a geração de um MDT, devido à quantidade de pulsos que chegam ao solo. A intensidade do pulso que retorna ao sensor é determinada pela dimensão dos objetos em relação à projeção do feixe, pela sua orientação e pela refletividade dos elementos que compõem a superfície da área iluminada, ou seja, o objeto e a posição da projeção do objeto, definem se um pulso pode atingir vários objetos e ser refletido por todos os pontos atingidos em diversas distâncias em relação ao sensor. Por conseguinte, o ponto mais próximo irá fornecer o retorno parcial do feixe *LASER* (primeiro retorno) de forma mais rápida, enquanto o ponto mais distante fornecerá um último retorno parcial do feixe *LASER*. Este fato, associado ao fato de que a área iluminada pelo feixe, depende da altura de voo, se torna relevante quando se considera a diferença de penetração que pode existir a partir de um único pulso, o que pode permitir a distinção de elevações (BEHAN, 2000).

De acordo com Shan e Toth (2008), a qualidade da superfície gerada depende da acurácia dos subsistemas envolvidos (*LASER*, GNSS e IMU) e dos parâmetros de calibração relacionados a esses componentes. Em geral, o fabricante do sistema fornece uma faixa de acurácia esperada para a nuvem de pontos gerada. Por exemplo, os sistemas ALTM 2050 e ALTM 3100 da Optech fornecem uma acurácia em altimetria de 25 cm, quando utilizados a uma altura de voo de 2000 m. Os dados do SVLA pós processados podem fornecer MDTs em áreas arborizadas com uma precisão equivalente aos MDTs fotogramétricos em áreas abertas, os quais são geradas a partir de imagens em escalas grandes. Utilizando o método de filtragem e interpolação (KRAUS e PFEIFER, 1998), realizaram uma classificação automática dos pontos oriundos dos dados *LASER* em pontos do terreno e da vegetação. Os experimentos de Kraus e Pfeifer (1998) mostraram que se o feixe de *LASER* for refletido no topo ou nos galhos mais baixos de uma árvore, este ponto de vegetação ficará muito alto em relação ao terreno. Isso resultará em uma distribuição assimétrica de erros dos pontos obtidos pelo SVLA. De acordo com os experimentos realizados pelos autores, a taxa de penetração pode ficar abaixo

de 25% em áreas de florestas em terrenos planos. Para calcular um DTM de alta qualidade, é necessário eliminar todos os pontos de vegetação sem apagar os pontos de terreno. Especificamente em áreas com taxas de penetração muito baixas, eliminar todos os pontos de vegetação sem eliminar os pontos de terreno, pode se tornar uma tarefa complexa. A precisão obtida para os MDTs oriundos do processamento de dados *LASER* para terrenos planos foi de ± 25 cm. Após melhorias no processamento dos dados, foi obtida uma precisão de ± 10 cm para os MDTs gerados por SVLA (KRAUS e PFEIFER, 1998). Equipamentos modernos permitem acurácia altimétrica de aproximadamente 7 cm para áreas de terreno planos, por exemplo (STEREŃCZAK et al., 2013).

O conceito de MDS se distingue do MDT por ser uma descrição que envolve a cota superior dos objetos acima do terreno. Ao subtrair o MDT do MDS pode-se obter o Modelo de Altura de Dossel ou *Canopy Height Model* (CHM). O CHM permite que sejam extraídas informações relevantes para compor um inventário florestal, como o diâmetro de copa e altura das árvores, por exemplo. O CHM representa a altura do dossel acima dos pontos situados no MDT. Para se obter o CHM, geralmente é realizada uma interpolação a partir do primeiro retorno do pulso *LASER* dos pontos e é realizado o cálculo da altura dos pontos acima do MDT.

No entanto, gerar um CHM normalizando os pontos *LASER* brutos é um desafio se as árvores estiverem localizadas em terrenos com grandes variações de declividade. Nestes terrenos complexos, os valores de altitude referentes à parte inferior ou à parte superior de uma copa de árvore podem ser normalizados por altitudes interpoladas do MDT que podem ser muito mais baixas ou mais altas que a altitude real da base do tronco da árvore. A medição da altura das árvores e o delineamento da copa dependem principalmente da identificação de máximos locais, com cada máximo local correspondendo à localização de uma copa individual e os segmentos circundantes formando a copa da árvore (VÉGA e DURRIEU, 2011). Embora alguns autores tenham tentado encontrar máximos locais diretamente na nuvem de pontos LIDAR (LI et al., 2012), a maioria dos usuários operacionais de dados *LASER*, gera um CHM raster a partir dos primeiros retornos de pulsos *LASER* e, em seguida, extraem os máximos locais desse CHM raster (HYYPÄ et al., 2008; LIM et al., 2003b). Na detecção da copa das árvores, um retorno do pulso *LASER* identificado erroneamente como um ponto no alto da copa, porém localizado na parte inferior da árvore (base, tronco) é caracterizado como um falso máximo local, que está distante da copa das árvores (KHOSRAVIPOUR et al., 2014).

2.5.1 Classificação dos dados SVLA

Em aplicações no segmento florestal, para obter produtos precisos a partir das nuvens de pontos obtidas pelo SVLA, é necessário que se tenham pontos amostrais que definam a superfície do terreno para geração do MDT e as alturas das copas das árvores para geração do CHM. Para se obter os dois produtos é realizada a classificação dos dados através de algoritmos de filtragem.

Os filtros são construídos a partir de combinações de diferentes elementos. Portanto, para entender ou prever o comportamento e o resultado após a aplicação de um filtro, é necessário entender o modo como os elementos são combinados. Sithole e Vosselman (2003) identificaram sete elementos:

- Estrutura de dados

O dado SVLA é uma nuvem de pontos 3D com espaçamento irregular. Alguns filtros funcionam com a nuvem de pontos bruta. No entanto, pode-se obter bons resultados utilizando ferramentas de processamento de imagem. Alguns algoritmos de filtragem (ATIN – Axelsson (2000), por exemplo) interpolam a nuvem de pontos produzida pelo SVLA para uma grade regular, antes da filtragem (SITHOLE e VOSSelman, 2003).

- Teste de vizinhança e número de pontos filtrados

Os filtros usualmente operam de forma a considerar a vizinhança local de cada ponto. No processo de classificação (terreno ou objeto) dois ou mais pontos podem ser classificados ao mesmo tempo. Em relação à vizinhança, essa classificação pode ser feita de três maneiras possíveis: ponto a ponto, ponto a pontos, e pontos a pontos. Na classificação ponto a ponto, os algoritmos comparam dois pontos por vez. A função discriminante é baseada nas posições dos dois pontos. Se a saída da função discriminante estiver acima de um certo limite, presume-se que um dos pontos pertença a um objeto. Apenas um ponto é classificado por vez. Na classificação ponto a pontos, os algoritmos usam pontos vizinhos (de um ponto de interesse) para resolver uma função discriminante. Com base no resultado da função discriminante, o ponto de interesse pode ser classificado. Um ponto é classificado de cada vez. Já na classificação pontos a pontos, os algoritmos usam vários pontos para resolver uma função discriminante. Os pontos podem ser classificados de acordo com a função discriminante. Mais de um ponto é classificado para essa formulação (SITHOLE e VOSSelman, 2003).

- Medida de descontinuidade

A maioria dos algoritmos classificam a nuvem de pontos com base em alguma medida de descontinuidade. Algumas das medidas de descontinuidade utilizadas são: diferença de altura, declividade, menor distância em relação às faces TIN (Rede Triangular Irregular) e menor distância em relação às superfícies parametrizadas (SITHOLE e VOSSELMAN, 2003).

- Conceito de filtro

Segundo Sithole e Vosselman (2003), os filtros estimam a posição dos pontos de terreno em uma vizinhança local. Assim, é formado o conceito do filtro (Figura 6). Este conceito permite classificar os métodos de filtragem em:

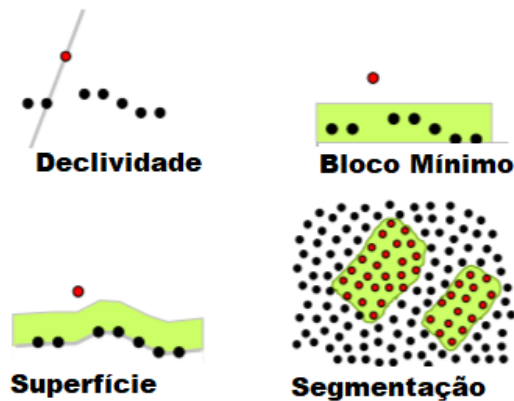
Baseados na Declividade: A ideia básica deste método baseia-se na observação de que é improvável que uma grande diferença de altura entre dois pontos próximos seja causada por uma inclinação acentuada no terreno. Assim, assume-se que provavelmente, o ponto mais alto não é um ponto no terreno. Considerando uma diferença de altura, a probabilidade de que o ponto mais alto possa ser um ponto no solo diminui se a distância entre os dois pontos diminui. Portanto, Kilian et al. (1996) introduzem pesos dependendo do tamanho do núcleo do filtro morfológico e Pfeifer et al. (1998) pesam implicitamente as alturas por uma função de covariância que depende da distância entre dois pontos (VOSSELMAN, 2000).

Superfície: Os mínimos locais da nuvem de pontos são assumidos como pontos de terreno e originam uma superfície inicial. Um ponto pode ser considerado ponto de terreno, se a distância entre o ponto e a superfície for menor do que um limiar pré-selecionado (SITHOLE e VOSSELMAN, 2003).

Segmentação/Agrupamento: O algoritmo considera que os pontos de um segmento (*cluster*) pertencem a um objeto se o segmento estiver acima de sua vizinhança (SITHOLE e VOSSELMAN, 2003). Para que este conceito funcione adequadamente, os segmentos devem delinear objetos e não apenas as faces triangulares dos objetos.

Bloco Mínimo: este algoritmo identifica o menor valor em uma região da nuvem de pontos, que supostamente é identificado como terreno. Em relação à sua altura se definem dois planos horizontais de tolerância. Os pontos de terreno são esperados na região entre os planos (SITHOLE e VOSSELMAN, 2003).

Figura 6 – Conceitos de Filtros.



Fonte: Adaptado de Sithole e Vosselman, 2003.

- Etapa única vs. iterativa

Alguns algoritmos de filtragem classificam pontos em um único passo, enquanto outros repetem e classificam pontos em vários passos. A vantagem de um algoritmo de etapa única é a velocidade computacional. Contudo, a maior velocidade computacional pode implicar em menor precisão, com base no raciocínio de que em cada passo mais informações são coletadas sobre a vizinhança de um ponto e, portanto, uma classificação muito mais confiável pode ser obtida em vários passos (SITHOLE e VOSSelman, 2003).

- Substituição vs. Seleção

Segundo Sithole e Vosselman (2003), na seleção, um ponto filtrado é removido de uma nuvem de pontos. A seleção é normalmente usada em algoritmos que operam em nuvens de pontos com espaçamento irregular. Em uma substituição, um ponto filtrado retorna à nuvem de pontos com uma altura diferente (geralmente interpolada considerando sua vizinhança). A substituição geralmente é usada em algoritmos que operam em nuvens de pontos (rasterizadas) espaçadas regularmente.

- O uso de dados do primeiro pulso e reflectância

Alguns *scanners* podem registrar múltiplos ecos para cada pulso enviado, isto é, registrar a distância (e possível intensidade de retorno do pulso) de vários objetos ao longo da trajetória do pulso e dentro do diâmetro do pulso (*footprint*). O registro de múltiplos ecos pode ser útil, quando o perfil vertical de múltiplos objetos localizados dentro do diâmetro do pulso laser (ou pelo menos o objeto mais alto e o mais baixo), como no caso de árvores, é necessário (LOCH et al., 2004). Diferentes superfícies na paisagem absorvem ou refletem pulsos de maneira diferente e, portanto, pode ser possível usar essas informações para a classificação (SITHOLE e VOSSelman, 2003).

A filtragem dos dados SVLA pode ser feita por diversos algoritmos, conforme descrito anteriormente. Esses algoritmos estão implementados em *softwares*, como, por exemplo, *LAStools*. O pacote de software *LAStools* é uma biblioteca de scripts para processamento de dados SVLA. Trata-se de uma coleção de ferramentas em linha de comando altamente eficientes, com scripts em lote. É possível classificar, agrupar, converter, filtrar, rasterizar, triangular, contornar, cortar e poligonizar dados *LASER*. Todas as ferramentas também podem ser executadas por meio de uma interface gráfica do usuário e estão disponíveis como uma caixa de ferramentas de processamento *LASER* para o ArcGIS versões 9.3, 10.0 e 10.1 da ESRI (RAPIDLASSO, 2018).

2.5.2 Geração de Modelos Digitais de Terreno

Os modelos digitais são representações de superfícies através de elevações, que permitem que sejam realizadas extrações de informações do terreno e de outras características. Os modelos digitais podem ser classificados em: Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS). O MDT é definido pelas elevações de pontos do terreno e não representa superfícies que não estejam a nível do solo, como copas de árvores e prédios. O MDS é definido pelas elevações de pontos do terreno e também pelas elevações de feições da superfície.

É prática comum classificar os pontos de uma nuvem de pontos em pontos do terreno e pontos fora do terreno (nas áreas arborizadas, esses pontos são chamados de pontos de vegetação). Conforme citado na seção 2.5 (Processamento dos dados SVLA), se o pulso *LASER* for refletido nos galhos superiores ou inferiores de uma árvore, um ponto de vegetação medido ficará muito alto em relação ao terreno, resultando em uma distribuição de erros assimétrica dos pontos no terreno, obtidos por um SVLA. Krauss e Pfeifer (1998) indicaram que a taxa de penetração na vegetação pode ser inferior a 25% em florestas densas. Para gerar um MDT de alta qualidade, é necessário eliminar todos os pontos de vegetação sem excluir os pontos de terreno. Especialmente em áreas com taxas de penetração dos pulsos *LASER* muito baixas, como no caso de florestas densas (floresta tropical), isso pode se tornar difícil (KRAUS e PFEIFER, 1998). Para desenvolver um método de filtragem que considere o erro de distribuição, Kraus e Pfeifer (1998) implementaram um algoritmo baseado em predição robusta (KRAUS e MIKHAIL, 1972), definindo uma acurácia individual para cada medida de altitude efetuada, e que funciona iterativamente para eliminar pontos acima da superfície.

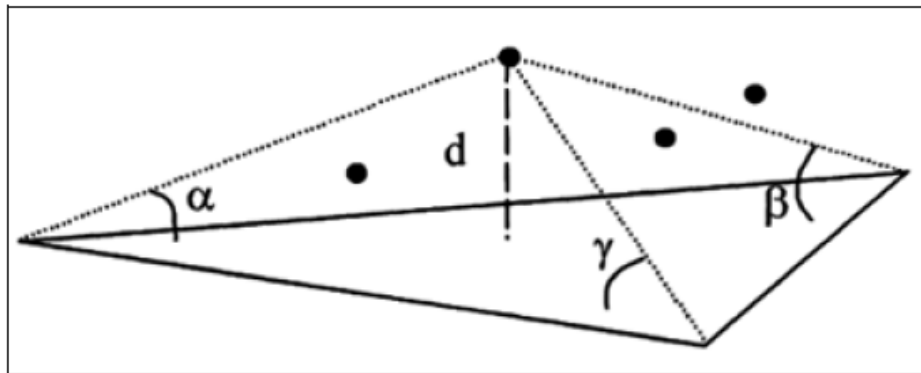
Primeiramente, é estimada uma superfície média do terreno com pesos iguais para todas as altitudes. Calculam-se as distâncias de cada ponto obtido pelo escaneamento *LASER* até esta, denominadas de resíduos. Geralmente, os pontos correspondentes ao terreno apresentam maior probabilidade de apresentarem resíduos negativos e recebem pesos mais altos, enquanto os pontos pertencentes à vegetação são mais propensos a apresentarem resíduos positivos. Como os pontos pertencentes a vegetação serão eliminados, estes recebem pesos mais baixos. Os dados de entrada para a próxima iteração são todos os pontos com os pesos atualizados, utilizados como dados para estimar novamente a superfície do terreno. Após de cada iteração, espera-se obter um resultado aproximado da classificação dos pontos que pertencem ao terreno e os pontos não pertencentes ao terreno. Este algoritmo pode ser aplicado para regiões de florestas. Os melhores resultados obtidos por Kraus e Pfeifer (1998) atingiram uma precisão para o MDT de, aproximadamente, 10 cm em terrenos planos, e apresentaram algumas dificuldades na obtenção de detalhamento geomorfológico, devido à baixa densidade obtida pelos sensores *LASER* utilizados no estudo. O método provou ser útil mesmo para uma taxa de penetração de 25%, quando os pontos de vegetação e de terreno são combinados, conforme citado na seção 2.5 desse estudo.

Outro exemplo é o filtro de densificação progressiva *Adaptive TIN* (ATIN), que utiliza a distância do ponto à superfície de um TIN para selecionar pontos de terreno dos dados *LASER* (AXELSSON, 2000). Este filtro seleciona inicialmente uma pequena amostra de pontos de menor altitude, os quais são seguramente representativos da superfície do terreno. Os pontos são triangulados para gerar um TIN. Em cada iteração, cada ponto é testado e adicionado ao TIN, caso esteja abaixo do limiar. Os parâmetros dos limiares são os ângulos entre as arestas que definem as faces do TIN e a distância mais próxima dos nós das faces. No final de cada iteração, o TIN e os limiares gerados por estes dados são recalculados (pontos de terreno recentemente identificados são incluídos nos cálculos). Novos limiares são calculados baseados nos valores das medianas estimadas através de histogramas em cada iteração. O processo iterativo é finalizado quando não houver mais pontos que estejam abaixo do limiar.

A Figura 7 apresenta uma face triangular (traços sólidos) de um TIN e 4 pontos localizados na área triangular para que sejam avaliados. Para cada ponto a ser analisado são calculados 3 ângulos (α , β e γ) entre a face do TIN e as três direções ligando os vértices da face triangular e o ponto a ser analisado, além da distância d entre o ponto a ser analisado e a face triangular. O ponto em análise é considerado pertencente ao terreno, se e somente se, a distância d for menor que o limiar de distância e os ângulos α , β e γ forem menores que o

limiar angular. Este processo é realizado para todos os pontos da nuvem, e os limiares angulares e de distância são re-estimados, porém baseados nos pontos pertencentes ao terreno. Conforme citado anteriormente, o processo é iterativo e se repetirá até que não haja mais nenhum ponto que possa ser classificado como ponto pertencente ao terreno (DAL POZ, 2013).

Figura 7 – Princípio do Método de Filtragem ATIN.



Fonte: Dal Poz, 2013 - Adaptado de Axelsson, 2000.

A principal característica desse algoritmo é trabalhar superfícies com descontinuidades, o que o torna favorável a superfícies urbanas (AXELSSON, 2000). Este mesmo algoritmo foi utilizado por Pereira (2014) em áreas de campo e vegetação, e apresentou a classificação correta para 89 % dos pontos entre solo e vegetação. A porcentagem de erro se deve às dificuldades para classificar a vegetação rasteira. Martins Neto (2016) comparou o filtro de Kraus e Pfeifer (1998) com o filtro ATIN de Axelsson (2000) para uma área de vegetação de *Pinus taeda* e verificou que o filtro ATIN apresentou curvas de nível com menor nível de ruído.

Além dos algoritmos citados, há o método de filtragem de Declividade Local Máxima (declividade). Este método é baseado no método de filtragem de declividade, citado na seção 2.5.1. A função deste filtro é representada pela Equação 9 adaptada (VOSSSELMAN, 2000) e pode ser usada para definir o conjunto de pontos que são classificados como pontos de terreno. Seja A o conjunto de todos os pontos e MDT o conjunto de pontos de terreno, tem-se:

$$MDT = \{p_i \in A \mid \forall p_j \in A : h_{p_i} - h_{p_j} \leq \Delta h_{\max}(d(p_i p_j))\} \quad (9)$$

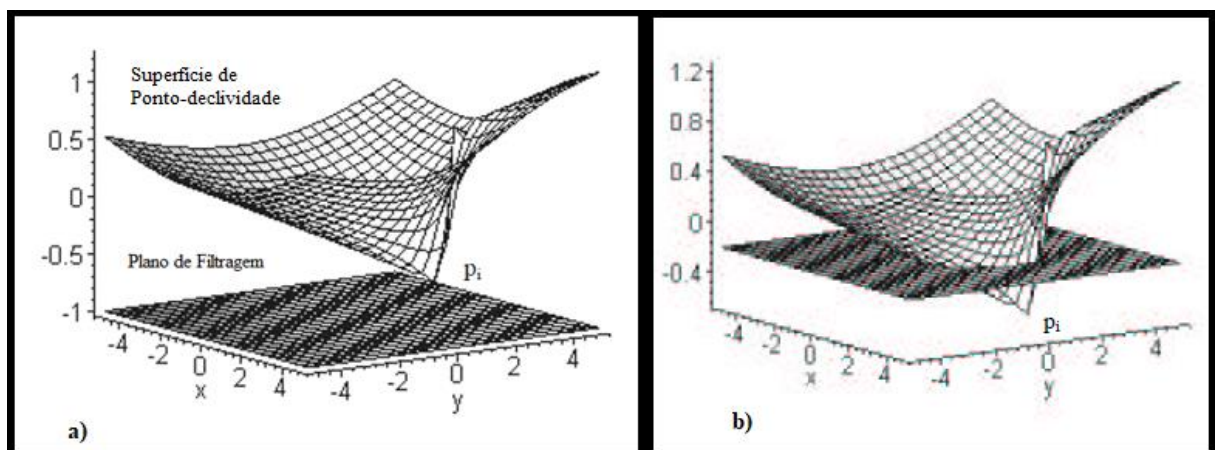
Onde:

p_i é um ponto no conjunto de dados;

p_j é um ponto no conjunto de dados ($p_i \neq p_j$);
 h_{p_i} e h_{p_j} são as alturas de p_i e p_j , respectivamente;
 $d(p_i, p_j)$ é a distância entre os pontos p_i e p_j ;
 $\Delta h_{\max}$ é a diferença de altura máxima entre os pontos p_i e p_j .

Ou seja, um ponto p_i é classificado como um ponto do terreno se não houver outro ponto p_j na vizinhança, tal que a diferença de altura entre esses pontos seja menor que a diferença de altura máxima permitida considerando a distância entre esses pontos (VOSSSELMAN, 2000). A mecânica básica do filtro baseado em declividade é ilustrada na Figura 8. A superfície curva mostrada na Figura 8 representa a declividade dos vetores a partir do ponto p_i , a todos os outros pontos da superfície. Esta superfície será chamada de superfície de ponto-declividade. Na Figura 8.a o plano de filtragem é o negativo do valor absoluto do gradiente dos geradores do cone. Se o plano de filtragem toca a superfície dos pontos de declividade, p_i é filtrado, assim como é apresentado na Figura 8.b. Na Figura 8.a, o plano de filtragem não toca a superfície dos pontos de declividade, então, o ponto p_i não é filtrado. No entanto, este filtro não obteve sucesso em todas as circunstâncias, pois removeu pontos com base no limite predefinido. Assim, para superar essa limitação, o filtro foi modificado para que o plano de filtragem varie (define os pontos que serão removidos) em relação à declividade do terreno (SITHOLE, 2001).

Figura 8 – Mecânica do filtro original de declividade local máxima.
 a) O ponto p_i não é filtrado. b) O ponto p_i é filtrado.



Fonte: Adaptada de Sithole (2001).

O algoritmo de filtragem por densificação progressiva ATIN está implementado na ferramenta *lasground* da biblioteca do *LAStools*. Antes de executar o algoritmo, existem

alguns parâmetros que podem ser configurados pelo usuário e que podem melhorar a qualidade do resultado. Os parâmetros são: *step*, que determina o tamanho da grade; *spike*, que remove pontos acima e abaixo do TIN; *offset*, que define o nível máximo de inclusão de novos pontos na superfície de terreno atual; e *standard deviation* (stddev), que determina o desvio padrão máximo da distância (em centímetros) para áreas planas; e *bulge*, que define o limite de aumento das dimensões das faces dos triângulos do TIN bruto. Quanto menor for o valor configurado para essa função, menores serão as alterações no TIN e mais características (pequenas variações locais de elevações, por exemplo) serão removidas (LUDWING BOLTZMANN INSTITUTE, 2020). Além disso, o usuário dispõe de cinco opções para definir a rugosidade do terreno: *fine*, *extra-fine* ou *ultra-fine*, para intensificar a busca por pontos em encostas muito inclinadas, por exemplo.

Em áreas de floresta tropical, sem edificações, o *lasground* mostra-se suficiente para a filtragem, devido às suas características, como mostram os resultados obtidos em testes realizados para diferentes algoritmos de filtragem por Căţeanu e Arcadie (2017). Os experimentos realizados por Căţeanu e Arcadie (2017) utilizando o *lasground* apresentaram um valor de RMSE (Root Mean Square Error – Raiz do erro quadrático médio) nas altitudes de 0,53 m, considerando todos os retornos dos pulsos *LASER* e um valor de RMSE de 0,52 m, considerando apenas os últimos retornos dos pulsos. O algoritmo foi aplicado para pontos *LASER* obtidos em uma área montanhosa e de cobertura densa de vegetação e apresentou o segundo melhor resultado quando comparado com outros algoritmos (MLS, SMRF, ETEW, Mongus & Zalik, MCC, Kraus & Pfeifer, e BCAL).

Após classificar os pontos da nuvem em pontos de terreno e pontos não pertencentes ao terreno, é necessário realizar a interpolação do MDT (SHAN e TOTH, 2008). Existem modelos matemáticos que permitem a interpolação de uma amostra de pontos irregulares, distribuídos no espaço, em uma malha regular tridimensional. Um método de interpolação frequentemente utilizado para dados *LASER* é o interpolador Inverso da Distância Ponderada, ou *Inverse Distance Weighted* (IDW). O IDW é um interpolador de média ponderada, que calcula a altitude do ponto desconhecido pela média ponderada dos valores de pontos conhecidos (PEREIRA, 2014). Para isso, atribui-se aos pontos uma potência de ponderação, sendo a de segundo grau a mais utilizada (SILVA, 2011). Esta potência determina a forma como a distância da malha de pontos é distribuída. Quanto maior o grau de potenciação (Equação 10), menor será o efeito dos pontos mais afastados da malha na interpolação. Já quando se determina uma potência menor, os pesos serão mais uniformemente distribuídos pelos pontos de dados vizinhos (YANG et al., 2004).

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (10)$$

Onde:

$z^*(x_0)$ = estimativa do ponto não amostrado;

$z(x_i)$ = ponto conhecido;

λ_i = peso associado a cada uma das amostras em que (Equação 11):

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i^n} \quad (11)$$

Onde:

d_i^n = distância da amostra i ao ponto a ser estimado.

Este algoritmo de interpolação (IDW) está implementado na ferramenta *grid_terrain* no módulo *knnidw* do pacote *lidR*. Este algoritmo implementado realiza uma interpolação espacial usando uma abordagem de k-vizinhos mais próximos (KNN) juntamente com o IDW. Os parâmetros a serem configurados são: k, que é número de k-vizinhos mais próximos, sendo o padrão 10; e p, que é a potência para ponderação de distância inversa, sendo o padrão o grau 2.

Outro método de interpolação é o de Vizinho Natural (*Natural Neighbor*). Este método foi criado por Robin Sibson (1981) e usa os diagramas de Voronoi e *Delaunay* de um conjunto discreto de pontos espaciais. Para interpolar um valor, o algoritmo aplica um peso aos pontos mais próximos com base em suas áreas proporcionais. A Equação 12 é usada para interpolação de vizinhos naturais.

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i, y_i) \quad (12)$$

Onde $G(x, y)$ é o valor estimado do vizinho natural em (x, y) , n é o número de vizinhos mais próximos a serem usados para a interpolação, $f(x_i, y_i)$ representa os valores observados em (x_i, y_i) , e w_i é o peso associado (ASHRAF et al., 2017).

Este algoritmo está implementado na ferramenta *grid_terrain* no módulo TIN da biblioteca lidR desenvolvida por Roussel et al. (2018). A interpolação espacial realizada pela ferramenta é baseada em uma triangulação de Delaunay, que executa uma interpolação linear dentro de cada triângulo. Para os pontos localizados em extremidades que não podem ser interpolados com uma triangulação, a extrapolação é feita usando a abordagem do vizinho mais próximo.

2.5.3 Controle de Qualidade do MDT

Apesar do desenvolvimento de algoritmos especializados para resolver o problema de extração de MDT em terrenos de florestas a partir de dados gerados por SVLA, esse tipo de processamento ainda enfrenta alguns desafios. O levantamento utilizando um SVLA envolve parâmetros que podem afetar o processo de geração de MDT em terrenos com cobertura de florestas densas (florestas tropicais), como, por exemplo, altura de voo, densidade da varredura *LASER*, ângulo de divergência do pulso *LASER*, densidade da cobertura florestal (espessura da copa), inclinação do terreno e ângulo de varredura. Esses parâmetros têm um efeito direto sobre a taxa de penetração de pulsos LiDAR através do dossel da floresta e, portanto, podem afetar o número dos pulsos que atingem o solo (SITHOLE e VOSELMAN, 2004; HYYPPÄ et al., 2005).

Para verificar se o MDT gerado atende às especificações do projeto é necessário realizar um controle de qualidade. O controle de qualidade externo do MDT pode ser realizado através da diferença entre as altitudes dos pontos de apoio e as altitudes interpoladas do MDT gerado através dos dados coletados pelo SVLA. A função *lascontrol*, implementada no Lastools, interpola as altitudes do MDT para as mesmas posições planimétricas dos pontos de controle, calcular as discrepâncias e o RMSE, que varia de acordo com a área de estudo (KRAUS e PFEIFER, 1998). Em florestas boreais, os erros no MDT são menores que de 20 (HYYPPÄ, 2005). As florestas tropicais apresentam uma densidade de cobertura superior às florestas boreais, assim, espera-se que a exatidão encontrada no MDT seja menor, devido à necessidade de um alto nível de filtragem e remoção de pontos, à menor penetração de pulsos e à grande densidade de vegetação.

2.5.4 Geração de Modelo de Dossel (CHM - *Canopy Height Model*)

O CHM, ou Modelo de Altura de Dossel, é um modelo normalizado de áreas com cobertura florestal, gerado através da subtração do MDS pelo MDT. O CHM representa a altura do dossel acima do terreno. O MDS do dossel é normalmente calculado por meio do primeiro eco de pulso e o MDT pelos ecos de pulsos que atingiram o terreno. As alturas das copas são simplesmente calculadas como a diferença entre os valores de altitude dos retornos dos pulsos *LASER* e os valores estimados de altitude do terreno (a partir do MDT) na localização correspondente (HYYPÄ et al., 2008; VAN LEEUWEN et al., 2010). Para garantir que não haja erros sistemáticos entre os dados do primeiro e último pulso, deve ser realizada uma calibração usando áreas planas sem vegetação, como estradas, telhados e campos de esportes. Esta calibração é especialmente necessária quando os SVLA exigem que o primeiro e último eco sejam gravados separadamente.

Os CHMs derivados de dados SVLA vêm sendo usados para extrair informações de parâmetros das florestas. Entretanto, variações das alturas das copas das árvores causam algumas falhas, que comprometem a qualidade do CHM, afetando negativamente a detecção de árvores e mensurações biofísicas. Essas falhas ocorrem onde os pulsos *LASER* penetram profundamente na copa de uma árvore, atingindo um galho mais baixo ou o solo para produzir o primeiro retorno (KHOSRAVIPOUR et al., 2014).

Khosravipour et al. (2014), desenvolveram um algoritmo que corrige essas falhas, e melhora a acurácia na detecção das árvores, denominado algoritmo *Pit-free*. Antes de executar o algoritmo, os pontos *LASER* são normalizados em altura, substituindo a altitude de cada ponto (ou seja, a coordenada *z*) com sua altura acima do terreno, gerando, portanto, o CHM. Consequentemente, as alturas de todos os retornos classificados como terreno são nulas. Esses pontos *LASER* normalizados (CHM) são usados como entrada para o algoritmo *Pit-free*, citado anteriormente. O pré-processamento foi implementado usando *batch-scripting* nos módulos *lastile* e *lasheight* do LAStools (RAPIDLASSO, 2018). Este algoritmo compreende duas etapas: a primeira é construir um CHM incluindo todos os primeiros retornos e, principalmente, alguns CHMs parciais, com os primeiros retornos que correspondem aos picos mais altos de vegetação; a segunda etapa é combinar todos estes CHMs em um CHM baseado nos valores mais altos de altura para todos os CHMs e para cada posição na estrutura *raster*. Este algoritmo pode ser facilmente implementado em linha de comando com um *script* que usa uma combinação eficiente dos módulos *las2dem* e *lasgrid* do software LAStools (RAPIDLASSO, 2018).

A subtração do modelo digital de terreno (MDT) da nuvem de pontos *LASER* bruta, para criar um conjunto de dados normalizado com o solo em altitude 0, está implementada na ferramenta *lasnormalize* da biblioteca *lidR* (ROUSSEL et al., 2018). O MDT pode se originar de um arquivo externo ou pode ser calculado pelo usuário com os procedimentos anteriormente descritos.

A qualidade da interpolação das bordas do conjunto de dados depende do método de interpolação usado. Portanto, um *buffer* em torno da região de interesse é sempre recomendado para evitar efeitos de borda. O atributo Z do objeto LAS retornado é a altitude normalizada (ROUSSEL et al., 2018). Para eliminar os pontos que não estejam compreendidos entre a altura mínima e a altura máxima das árvores, pode-se utilizar a ferramenta *lasfilter*, onde os pontos retornados apresentam condições correspondentes às condições definidas.

Para gerar o raster do CHM, cria-se um modelo digital de superfície (MDS) usando os vários algoritmos possíveis. Se o usuário fornece uma nuvem de pontos normalizada, a saída será realmente um modelo de altura da copa (CHM). O algoritmo utilizado por este estudo para gerar o modelo CHM foi o *p2r*, desenvolvido por Roussel (2018) e que pode ser utilizado com a ferramenta *grid_canopy*. Este algoritmo implementa um modelo digital de superfície baseado em um método que atribui a cada pixel do produto raster final a altura do ponto mais alto encontrado. A opção *subcircle* do algoritmo *p2r* quando encontra 8 pontos próximos de um ponto original, realiza a substituição destes pontos para apenas 1 ponto, de forma que a nuvem de pontos resultantes contenha menos pixels vazios ou erros grosseiros. O valor utilizado para esta varredura em forma de círculo foi de 0.1 m. Este algoritmo está implementado na biblioteca *lidR* (ROUSSEL et al., 2018).

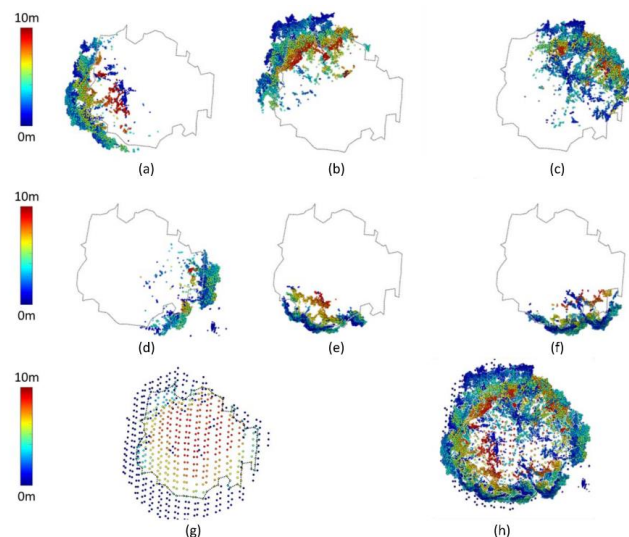
2.6 Integração dos dados SVLA e SVLT

Os dados provenientes do SVLA apresentam acurácia aproximada ao nível do decímetro (SHAN e TOTH, 2008). Porém, dependendo da altura de voo muitas vezes os dados adquiridos não atingem o terreno, ou no caso de vegetação, há dificuldade de adquirir dados dos troncos das árvores, devido a densa cobertura de folhagens. Por outro lado, os dados SVLT não só oferecem dados de alta precisão (1-5 cm), mas também são capazes de registrar os elementos que não são visíveis usando o SVLA. Assim, para gerar um modelo 3D dos dados SVLA e SVLT é necessário que seja feita uma combinação dos dados provenientes de ambos sistemas (PARIS et al., 2017).

A metodologia desenvolvida por Paris et al. (2017) para fundir dados SVLA e SVLT, consiste em segmentar algumas copas de árvores na nuvem SVLA, delinear as copas da vegetação dos dados SVLT, registrar os dados SVLT no sistema global do SVLA utilizando as copas das árvores, combinar a nuvem resultante do referenciamento com o resultado da delimitação de copas, obtendo assim a fusão 3D para as copas da vegetação (Figura 9). A Figura 9 apresenta a vista aérea da copa de uma árvore. Nas representações a, b, c, d, e, e f, são apresentados os pontos de varredura para diferentes trechos da copa da mesma árvore, dependendo da posição da estação de coleta. Esses pontos foram obtidos através dos dados SVLT. Já a etapa g, representa os pontos de varredura para a mesma copa, porém obtidos através dos dados SVLA. A etapa h representa os pontos de varredura integrados obtidos pelos dois sistemas (SVLA e SVLT).

Figura 9 – Etapas para integração de nuvens de pontos 3D.

Para a mesma copa: (a), (b), (c), (d), (e), e (f) correspondem aos dados SVLT, (g) corresponde aos dados SVLA, e (h) corresponde aos dados SVLA e SVLT integrados.



Fonte: Paris et al. (2017).

Para realizar a integração entre os dados SVLA e SVLT, é necessário aplicar inicialmente um modelo de transformação que preserve as distâncias entre os pontos da varredura e realize uma rotação e duas translações dos pontos para o mesmo sistema referencial que os dados SVLA. O modelo de transformação que garante estas características é o modelo de transformação de corpo rígido (WOLF, 2000). Utilizou-se o modelo de transformação de corpo rígido, pois considerou-se que o equipamento estava nivelado.

O modelo matemático da transformação de corpo rígido é representado por:

$$x' = \cos\theta * x - \sin\theta * y + Tx \quad (13)$$

$$y' = \sin\theta * x + \cos\theta * y + Ty \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix} \quad (15)$$

Denominando Lb como o vetor das observações, que, neste caso, corresponde ao vetor das coordenadas dos pontos de referência coletados nos dados SVLA, tem-se.

$$Lb = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ \vdots \\ x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

A matriz A ou matriz jacobiana é a matriz das derivadas parciais dos parâmetros na equação de transformação de corpo rígido.

$$A = \begin{bmatrix} -\sin\theta * x - \cos\theta * y & 1 & 0 \\ \cos\theta * x - \sin\theta * y & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (17)$$

A solução é apresentada pelo método dos mínimos quadrados:

$$X = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (18)$$

Onde L é o vetor resultante da diferença do vetor de observações Lb e o vetor L0 com os parâmetros aproximados. A matriz peso não será identidade, para permitir diferentes precisões para cada observação. A matriz peso é calculada de forma que o peso para cada observação seja a razão entre a variância a priori e a variância de cada observação. Desprezando-se as eventuais correlações entre as observações, chega-se a uma matriz peso diagonal.

Para esta transformação é necessário realizar a correção aos parâmetros aproximados através da soma do vetor das correções calculado com o MMQ, com os parâmetros

aproximados iniciais X_0 . Este cálculo é realizado através de um processo iterativo até se obter uma convergência para um valor aceitável.

$$X_a = X_0 + X \quad (19)$$

O vetor V dos resíduos para os parâmetros é dado por:

$$V = AX - L \quad (20)$$

Outro modelo matemático de transformação que pode ser citado é o modelo da transformação isogonal (WOLF, 2000) representado pela Equação 21. A transformação isogonal foi utilizada como um experimento adicional, pois não existe variação de escala nos modelos geométricos utilizados no estudo, pois ambos os sistemas (SVLA e SVLT) capturaram coordenadas em metros.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix} \quad (21)$$

Na forma linearizada, resultante do agrupamento de parâmetros:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$x' = (ax - by) + c \quad (23)$$

$$y' = (bx + ay) + d \quad (24)$$

Para estimar os valores dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados será necessário definir alguns valores.

O vetor das observações L_b corresponde ao vetor das coordenadas dos pontos de referência coletados nos dados SVLA.

$$Lb = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ \vdots \\ x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} \quad (25)$$

A matriz A contém os coeficientes dos parâmetros (a, b, c, d) na equação da transformação isogonal.

$$A = \begin{bmatrix} x & -y & 1 & 0 \\ y & x & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (26)$$

A Solução é apresentada pelo método dos mínimos quadrados:

$$Xa = (A^T P A)^{-1} (A^T P L b) \quad (27)$$

Os modelos de transformação isogonal e de corpo rígido apresentados permitem que se faça uma integração planimétrica, porém, para que a integração ocorra para as 3 dimensões, também é necessário uma transformação que permita a compatibilidade das altitudes dos pontos entre os dados SVLA e SVLT, o que pode ser feito por meio de uma translação simples, determinada com pontos comuns entre as duas nuvens, depois de devidamente registradas. O estudo não utilizou uma transformação de corpo rígido 3D, pois considerou-se que o SVLT foi nivelado ao realizar a coleta dos dados; além disso, ambos os sistemas medem distâncias, e portanto, suas escalas são conhecidas. Dessa forma, todas os pontos coletados necessitaram apenas de 1 rotação e três translações para serem compatíveis com os dados do SVLA. Conforme citado na versão 2.4.2, o método de interpolação utilizando vizinhos pode ser facilmente aplicado para que seja realizada uma interpolação dos pontos e através da distância calculada entre os pontos homólogos, é possível obter o valor médio da distância entre os pontos, que será o valor da translação para referenciamento altimétrico.

2.6 Extração das Variáveis Dendrométricas

Os inventários florestais consistem principalmente na medição de parâmetros estruturais em uma amostra de árvores para a estimativa de produção de parcelas florestais,

juntamente com a posição espacial dos troncos, copas, e identificação de espécies arbóreas. Essas medidas fornecem informações importantes na escala da floresta para avaliar a distribuição do tamanho e qualidade do tronco. Permite determinar os recursos de biomassa e bioenergia e prever a escassez de produtos florestais de acordo com o uso final das árvores. Os parâmetros estruturais medidos são denominados variáveis dendrométricas e algumas das variáveis dendrométricas padrão são: diâmetros a altura do peito (DAP), alturas das árvores, densidade do tronco, área basal e volumes comerciais de madeira (DASSOT et al., 2011).

O método convencional de medição das variáveis dendrométricas consiste na medição manual em campo. As alturas das árvores podem ser medidas do solo até o topo da copa usando um clinômetro sônico. A medida de altura pelo clinômetro pode ser muito complicada, pois exige observar o solo e as copas das árvores através do dossel de várias camadas e da biomassa densa de folhas, por exemplo. Para medir o DAP do tronco da árvore, é considerada a altura de 1,3 metros acima do solo e a medida é feita através de uma fita métrica de DAP (HOPKINSON et al., 2004).

A obtenção de dados para inventário de um povoamento florestal de forma convencional, demanda muito tempo e recursos. Este processo de coleta por medidas diretas é um processo demorado, pode gerar erros na medição das variáveis causadas, muitas vezes por falha humana, além da ocorrência de falhas na operação de equipamentos de forma errônea ou por condições adversas, como vegetação densa ou até mesmo cansaço da equipe (HOPKINSON et al., 2004).

Os *scanners* SVLT fornecem informações não destrutivas, precisas e detalhadas sobre a estrutura da floresta, as quais são difíceis ou impossíveis de se obter usando métodos tradicionais (LOUDERMILK et al., 2009). Entretanto, o uso do SVLT é limitado a pequenas áreas como parcelas de inventário florestal e também é limitado à dificuldade de obtenção de dados em florestas densas (MARTINS NETO, 2016; BUCK, 2012). Os sistemas SVLAs podem ser aplicados em áreas extensas de vegetação, auxiliando no inventário florestal. A alta densidade de pontos fornecida pelo SVLA é capaz de fornecer modelos acurados das copas das árvores e da altura da vegetação acima da superfície do solo (MARTINS NETO, 2016; BALTASAVIAS, 1999). Também, há limitação para áreas de vegetação densa, devido à dificuldade de penetração dos pulsos *LASER* no dossel denso, de forma que pode não ser possível obter as variáveis referentes aos troncos das árvores e referentes ao terreno (MDT). Para estes casos em específico há modelos de regressão que estimam as variáveis dendrométricas como DAP, volume, ou base da copa (MARTINS NETO, 2016). A vantagem de usar a integração dos dados provenientes dos sistemas SVLA e SVLT consiste na

possibilidade de se medir as variáveis dendrométricas mais importantes, DAP, altura das árvores, diâmetro da copa (DC), sem a necessidade de regressão para estimativa das variáveis.

Além dos modelos de regressão serem utilizados para estimar algumas variáveis dendrométricas, também podem ser utilizados como um método comparativo para as medidas realizadas diretamente nos dados SVLA e SVLT. Um modelo que vêm sendo testado em uma área de mata atlântica verifica as correlações existentes entre as variáveis DC e DAP utilizando também a variável das alturas das árvores, sendo representado pela Equação 28 (LEÃO et al., 2017).

$$DC = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 H \quad (28)$$

Onde:

DC: é o diâmetro da copa.

DAP: é o diâmetro a altura do peito.

H: é a altura da árvore.

β_0 , β_1 , e β_2 : são os coeficientes ajustados do modelo.

Este modelo pode ser ajustado pelo MMQ, onde DC são as observações, DAP e H são os coeficientes, e β_0 , β_1 , e β_2 são as incógnitas. Para o estudo presente, este modelo de regressão foi aplicado para estimar o DC das árvores principais selecionadas para o experimento, ou seja, uma medida que não seria viável de se obter em campo, devido à altura das árvores e densidade da cobertura vegetal da área de estudo. As medidas de altura são extraídas do CHM, enquanto, as medidas de DAP são extraídas dos dados SVLT. Através do modelo (28), pode-se estimar mais uma variável dendrométrica, uma vez determinadas as incógnitas do modelo. Todas as variáveis extraídas ou estimadas são referentes a um conjunto de árvores, ou seja, esse estudo não utiliza uma amostra abrangente para a aplicação do modelo de regressão.

3 MATERIAIS

Três levantamentos (2 aéreos e 1 terrestre) foram realizados na reserva Ponte Branca, situada na região Oeste do estado de São Paulo. Dois levantamentos foram realizados utilizando-se de um SVLA (*LASER Riegl LMS-Q 680i*) integrado a um sistema de *GNSS/Inercial Applanix POS-AV 510* embarcado em aeronave. O primeiro levantamento foi realizado a uma altura de voo de 2000 m e o segundo a uma altura de voo de 900 m para permitir uma comparação entre as características das nuvens de pontos obtidas (densidade de pontos, detalhamento de feições, por exemplo). Integrado ao SVLA havia uma câmara digital modelo *PhaseOne IXA 180*, coletando imagens RGB. No estudo presente não serão usadas estas imagens ópticas. O primeiro voo gerou três nuvens de pontos, enquanto o segundo voo obteve quinze nuvens de pontos, ou seja, uma nuvem para cada faixa de voo. O terceiro levantamento realizado foi utilizando um SVLT (*Scanner Leica ScanStation P40*): vinte e sete varreduras foram realizadas, situando o sistema estático em diferentes posições, para que cobrisse uma área de 40x 40 m (PLOT 6), que é a área de estudo.

Nas próximas seções serão abordados: a área de estudo, as especificações técnicas e descrição dos equipamentos utilizados, e os dados obtidos pelo SVLA e SVLT.

3.1 Área de Estudo

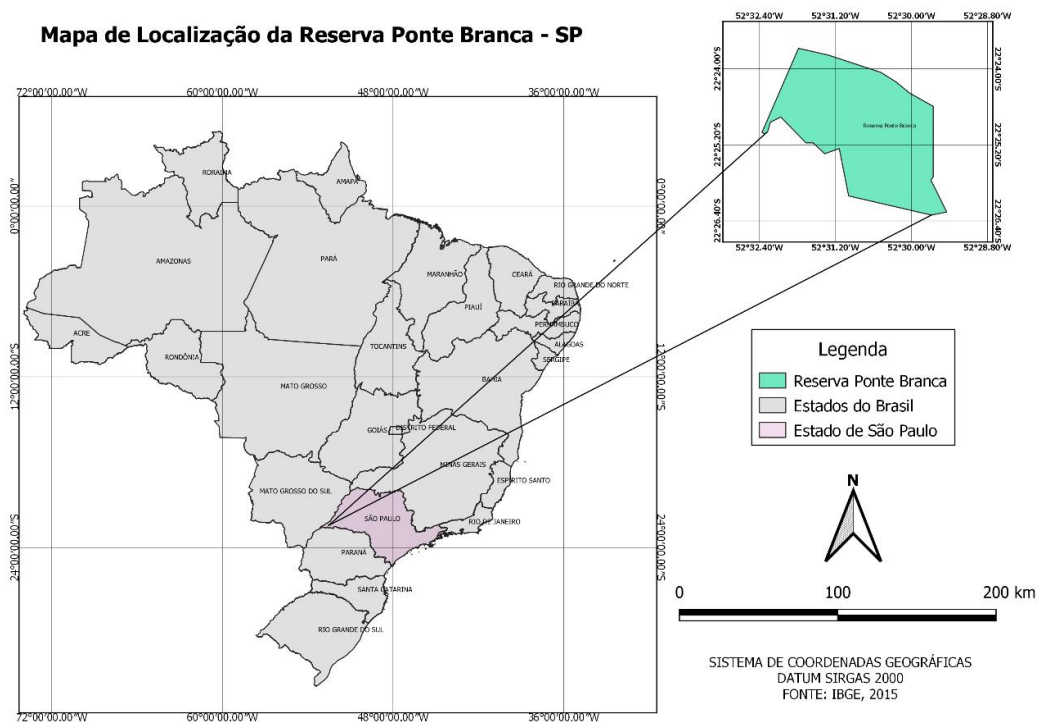
A área de estudo compreende uma porção de floresta tropical (Mata Atlântica), localizada na Reserva Ponte Branca – SP (Figura 10). A área de estudo é parte da Mata Atlântica e está localizada na Reserva Ponte Branca, possuindo árvores como Jatobá, Peroba e Amendoim. A maior parte da reserva apresenta bom estado de conservação, com a maior parte da vegetação classificada em Floresta Madura Alta (45%). As árvores emergentes na Floresta Madura, em alta densidade, têm até 25 m de altura e o dossel contínuo em torno de 12 m (MMA, 2007).

O SVLA obteve dados para toda a área da Reserva Ponte Branca, enquanto o SVLT obteve dados apenas para a porção referente ao PLOT 6 (Figura 11). Assim, a área principal de estudo trata-se de uma porção (PLOT 6) de área da Reserva Ponte Branca, localizada na região oeste do estado de São Paulo. É relevante ressaltar que a área de estudo apresenta biodiversidade florestal variada (Peroba, Amendoim, e Jatobá, são algumas das espécies encontradas na área de estudo) e foi escolhida para o desenvolvimento de metodologias visando a conservação e monitoramento do meio ambiente da região, e para que as variáveis

que serão extraídas através dos dados desse estudo sejam úteis posteriormente para outros estudos futuros aplicados a mesma região de floresta tropical da Reserva Ponte Branca - SP.

A área vem sendo estudada através de uma parceria entre o Departamento de Cartografia da FCT-UNESP, a Empresa Engemap Geoinformações (Engenharia Especializada em Geotecnologia) - SP, e o Instituto de Pesquisa Geoespacial Finlandês (FGI), considerando a importância da aquisição de informações das variáveis florestais para áreas de florestas densas, especificamente áreas de florestas tropicais. Um projeto que segue essa linha de pesquisa é o “*Unmanned Airborne Vehicle-based 4D Remote Sensing for Mapping Rain Forest Biodiversity and Its Change in Brazil (UAV_4D_Bio)*”. O projeto foi financiado pela Academia da Finlândia (AKA) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e tem como objetivo monitorar e estimar a biomassa e espécies em áreas florestais na Finlândia e no Brasil.

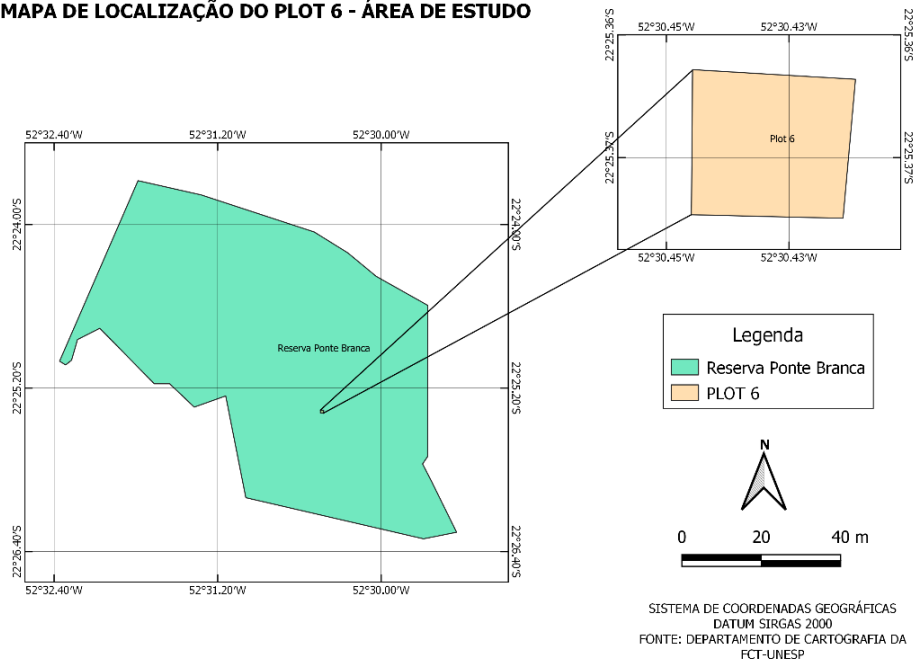
Figura 10 – Mapa de Localização da Reserva Ponte Branca - SP.



Fonte: Autora, 2020.

Figura 11 – Mapa de Localização do PLOT 6 - Reserva Ponte Branca, SP.

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO PLOT 6 - ÁREA DE ESTUDO



Fonte: Autora, 2020.

3.2 Equipamentos

Esta seção apresenta os equipamentos utilizados no estudo realizado. A seção 3.2.1 apresenta os equipamentos utilizados no Sistema de Varredura *LASER* Terrestre, enquanto a seção 3.2.2 apresenta os equipamentos utilizados no Sistema de Varredura *LASER* Aéreo.

3.2.1 Sistema de Varredura *LASER* Terrestre

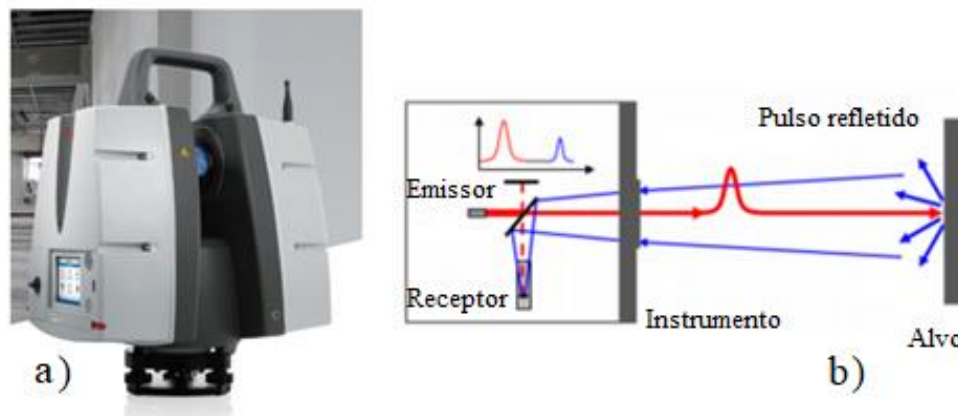
- *Scanner Leica ScanStation P40* (Figura 12a).

Os dados fornecidos por esse equipamento são medidas de ângulos e distâncias entre o equipamento e os alvos, a partir dos quais se geram as nuvens de pontos tridimensionais. O equipamento permite que seja feita uma varredura até uma distância máxima de 270 m, e pode capturar 1 milhão de pontos por segundo. O P40 é capaz de obter uma precisão de distância de 0,8 mm, quando as medidas são efetuadas a uma distância entre o sistema e alvo de até 10 metros.

A configuração de resolução pode ser realizada pelo usuário e utiliza como método de medição o tempo de retorno do sinal (Figura 12b) com um melhoramento pela tecnologia *Waveform Digitising* (WFD), que consiste em combinar os métodos de medição por tempo de retorno do pulso *LASER* com o método de mudança de fase.

O equipamento também fornece um sistema de imageamento de 700 megapixels para imagens panorâmicas e 4 megapixels para cada $17^\circ \times 17^\circ$ de imagem colorida. O sistema de imageamento foi utilizado somente para a primeira varredura do SVLT, pois o sistema de imageamento aumenta o tempo de coleta de dados pelo SVLT. As especificações das precisões de distância, posicional, e angular do equipamento são apresentadas na Tabela 1.

Figura 12– a). SVLT Scanner *Leica ScanStation P40*. b). Método de medição por tempo de retorno do pulso *LASER* combinado com análise de diferença de fase.



Fonte: *Leica Geosystems* (2015).

Tabela 1 – Especificações do Produto *Scanner Leica ScanStation P40*.

Especificações do Produto	
Taxa de aquisição de pontos	1.000.000 pontos/segundo
Distância Máxima de Operação	270 m
Precisão Posicional 3D	3 mm até 50m/ 6 mm até 100m
Precisão das distâncias	1,2 mm
Precisão Angular	8''
Comprimento de Onda	658 nm/1550 nm

Fonte: Adaptado de *Leica ScanStation P30 – P40 (User manual)*, 2015.

3.2.2 Sistema de Varredura *LASER* Aéreo

- *LASER RIEGL LMS-Q 680i* (Figura 13a).

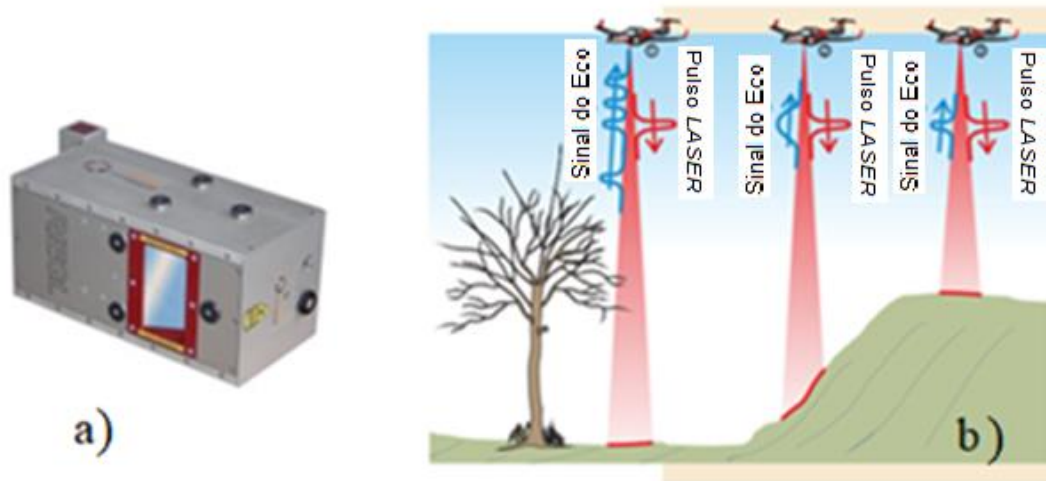
Este instrumento permite obter dados para a geração de nuvem de pontos tridimensionais através de varredura a *LASER* aérea. Este equipamento tem capacidade para atingir uma frequência de emissão de pulsos *LASER* de até 400 kHz, realizando uma medida efetiva de até 266 kHz a um ângulo de até 60° no terreno. Possui alta velocidade de escaneamento de até 200 linhas/segundo, precisão de até 20 mm na distância, apresentando um campo de visada de até 60°. Utiliza o método de medição por tempo de retorno do pulso *LASER*, e realiza um processamento *Multi-time-around* (MTA). Para a técnica do tempo de retorno do pulso *LASER* (LIDAR), existe uma frequência máxima sem ambiguidade, definida pela taxa de repetição da medição e pela velocidade da luz. Ao realizar a varredura *LASER* a uma taxa de repetição de pulso de 400 kHz, por exemplo, as medições acima de 375 m aproximadamente são ambíguas, ou seja, um pulso será emitido antes que anterior tenha retornado. As medições ambíguas podem ser separadas pela técnica conhecida como MTA.

O *LASER RIEGL LMS-Q 680i* é capaz de gravar e distinguir sinais de eco que chegam após um atraso de mais de um intervalo de repetição de pulso, permitindo medições além da frequência máxima. Técnicas de modulação do sinal são aplicadas ao conjunto de pulsos *LASER* emitidos, e isso permite medições sem restrições de intervalos de tempo de emissão. O esquema de modulação aplicado ao conjunto de pulsos *LASER* emitidos evita a perda de dados. Assim, o processamento MTA permite a utilização de sinais de ecos que forem detectados fora da faixa de ambiguidade entre dois pulsos *LASER* sucessivos. Isso aumenta a densidade de pontos e fornece precisão superior, o que resulta em melhores dados, além de permitir realizar levantamentos topográficos em terrenos complexos (RIEGL, 2012). Este equipamento também grava dados *full waveform*, mas somente serão utilizados os dados de múltiplos pulsos discretos para este projeto.

O uso de equipamentos que registram múltiplos pulsos de retorno é considerado vantajoso quando se trata de áreas de florestas, devido à característica do primeiro pulso ser geralmente no dossel, que nada mais é que o resultado da sobreposição dos galhos e folhas no topo das árvores, bem como o último pulso e pulsos intermediários nas copas das árvores, troncos, galhos e sub-bosque. Além de múltiplas medições de pulso, as intensidades dos pulsos retornados também são medidas. As geometrias da área escaneada pelos pulsos *LASER* absorverão e/ou refletirão pulsos de maneira distinta e, portanto, poderá ser possível usar

essas informações na classificação dos alvos. A Figura 13.b apresenta o comportamento dos sinais dos ecos para três tipos de superfícies: superfície plana com interferência do dossel, superfície inclinada, e superfície plana, respectivamente. Nota-se o retorno de múltiplos pulsos quando o feixe incide sobre uma árvore.

Figura 13 – a). LASER RIEGL LMS-Q 680i. b). Sinais dos ecos resultando de diferentes tipos de alvos.



Fonte: Adaptado de RIEGL, 2012.

- GNSS/Inercial Applanix POS-AV 510 (Figura 14).

Este equipamento fornece dados inerciais que, combinados com os dados GNSS (GPS + Glonass), resultam na solução de posicionamento e atitude. A IMU é constituída de três acelerômetros, que medem as acelerações lineares e de gravidade em um referencial tridimensional e três giroscópios, que medem as variações angulares de cada eixo no respectivo referencial.

As trajetórias são processadas utilizando o método diferencial pós-processado com bases curtas (*SmartBase Post-Processed*) no qual são utilizadas bases GNSS em solo com raio de até 30 km, o que resulta em trajetórias com precisão planimétrica de 5 cm e altimétrica de 10 cm. O POS-AV 510 utiliza uma IMU com giroscópios de fibra óptica (*Fibre Optic Gyros -FOG*) (PETRIE, 2011), que têm uma boa relação custo/qualidade, sendo amplamente utilizada em sub-sistemas GNSS/IMU empregados em SVLAs. Este equipamento atinge uma precisão angular de 0.005° em *roll* (X) e *pitch* (Y) e 0.008° em *heading* (Z), além de fornecer uma precisão de 0,02 m na posição horizontal com pós processamento, e 0,05 m na posição

vertical (SHAN e TOTH, 2008). A frequência do sistema inercial para coletar os dados brutos é de 200 a 300 Hz e de 10 Hz para os dados brutos do GNSS.

Figura 14 – GNSS/Inercial Applanix POS-AV 510.

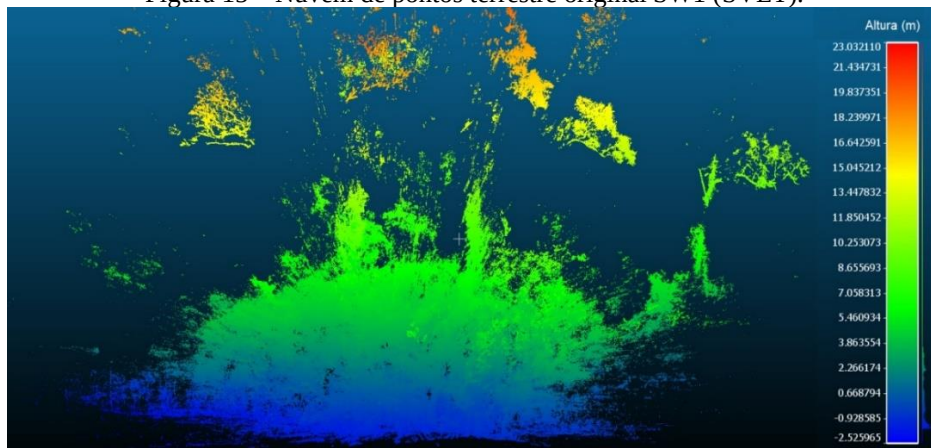


Fonte: Optech e Applanix.

3.3 Dados SVLT

Foram obtidas 27 nuvens de pontos pelo SVLT na porção representada pelo PLOT 6 da área de estudo. A missão da coleta dos dados SVLT ocorreu nas datas de 01 e 03 de outubro de 2016. A área de floresta denominada PLOT 6 foi escaneada com o *Scanner LASER* terrestre Leica *ScanStation* P40, posicionado em 27 estações, localizadas principalmente no limite da área. O *Scanner* foi configurado para fornecer uma densidade pontual de 6,3 mm entre os pontos obtidos a 10 m de distância do equipamento. A primeira nuvem de pontos obtida pelo SVLT é representada na Figura 15. As cores da nuvem SW1 estão classificadas de acordo com a altura dos pontos.

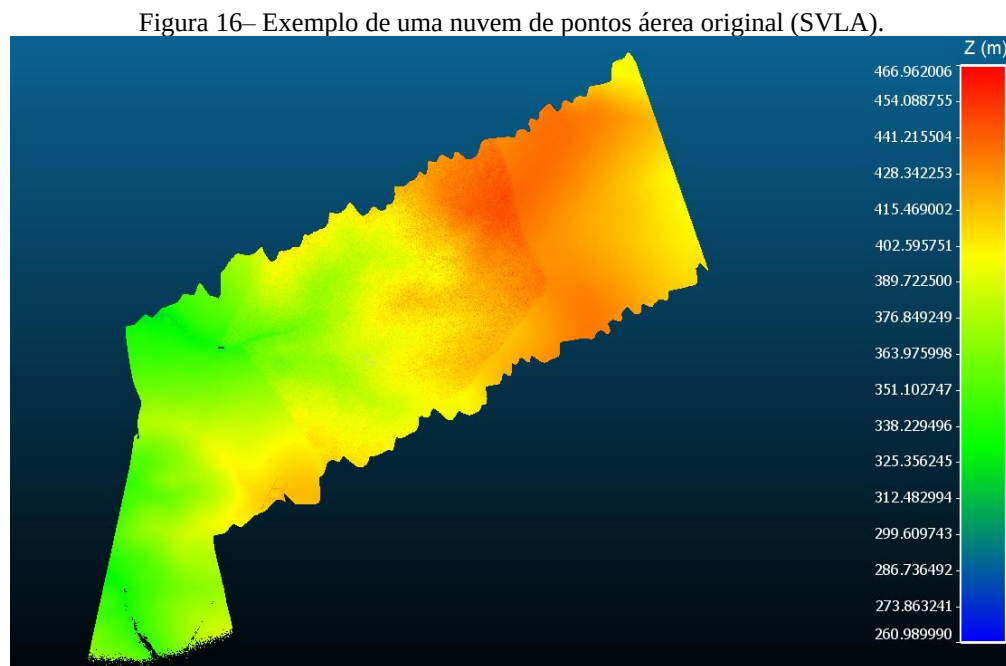
Figura 15 – Nuvem de pontos terrestre original SW1 (SVLT).



Fonte: Autora (2020).

3.4 Dados SVLA

Através do SVLA obteve-se 18 faixas de nuvens de pontos, sendo que as três primeiras faixas correspondem a uma altura de voo de 2000 m, e as outras 15 faixas foram coletadas a uma altura de voo de 900 m. As nuvens de pontos, em cada uma das faixas, foram obtidas através do SVLA em um voo efetuado pela equipe da Empresa Engemap Geoinformações. A faixa 1 obtida a uma altura de voo de 2000 m é representada na Figura 16. As cores da nuvem para a faixa 1 são classificadas de acordo com a altitude dos pontos.



Fonte: Engemap Geoinformações (2016).

4. DESENVOLVIMENTO

Os SVLAs têm sido cada vez mais usados na obtenção de dados necessários para realizar a medição estrutural de florestas para vastas áreas (HYYPÄ et al., 2008). Embora os SVLAs permitam cobertura rápida de áreas vastas, eles têm a limitação de obterem uma visualização somente da perspectiva aérea da floresta.

O uso dos SVLTs, como único sistema ou em combinação com SVLAs, permite uma aquisição com maiores níveis de detalhe do que a utilização exclusiva dos SVLAs sob um dossel da floresta (VAN LEEUWEN e NIEUWENHUIS, 2010). Por apresentarem maior nível de detalhe, os SVLTs são considerados adequados para medições florestais comerciais. Assim, pesquisas adicionais devem ser conduzidas para testar e validar esses instrumentos em florestas densas e em florestas antigas e complexas (DASSOT et al., 2011).

A proposta do projeto em questão é estudar o processamento e uso integrado de dados *LASER* aéreos e terrestres que seja adequado para florestas tropicais. Apesar de existirem estudos sobre a extração de variáveis dendrométricas a partir de dados *LASER* oriundos de SVLAs em áreas de florestas tropicais na Amazônia (MILLIKAN et al., 2019) e na Mata Atlântica (LEÃO et al., 2017), deve-se considerar as especificidades de cada floresta, além dos métodos adotados. Há escassez de estudos que utilizem a fusão de dados SVLA e SVLT em uma área de floresta tropical de Mata Atlântica. Esta pesquisa tem a proposta de produzir um estudo para uma área de floresta tropical de Mata Atlântica na região sudeste do Brasil, de forma que seja produzida a fusão de dados provenientes de duas fontes (SVLT e SVLA) e posterior extração das variáveis dendrométricas. O desenvolvimento do estudo é dividido em 4 etapas: processamento dos dados SVLT, processamento dos dados SVLA, integração dos dados SVLT e SVLA pós processados, e extração das variáveis dendrométricas de árvores selecionadas localizadas na área em estudo.

4.1 Processamento dos Dados SVLT

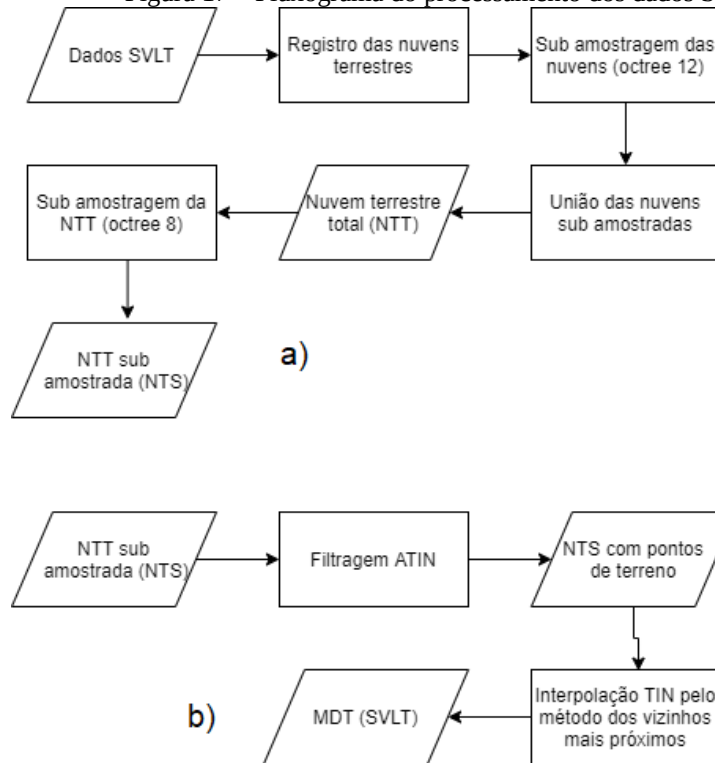
O processamento dos dados SVLT consiste inicialmente em realizar o referenciamento das 27 nuvens terrestres obtidas, para que todas as nuvens estejam registradas no mesmo sistema local. Na missão efetuada em campo, foram posicionadas esferas de referência (pontos de apoio) na área de estudo para auxiliar no referenciamento das nuvens. É possível realizar a detecção das esferas de forma automática através de um algoritmo de detecção do *Software Leica Cyclone*, que utiliza o raio das esferas como parâmetro de busca. Para

refinamento do referenciamento entre as nuvens terrestres, além da utilização das esferas é necessário encontrar feições comuns correspondentes, os troncos, por exemplo. Este processo foi realizado por um procedimento manual apoiado na cognição humana (EL ISSAOUI, 2018).

Devido à alta densidade de varredura e o grande número de pontos nas nuvens terrestres, aproximadamente 25 milhões de pontos em cada nuvem, é necessário realizar a redução ou subamostragem das nuvens de pontos para que seja possível reduzir o espaço de armazenamento e agilizar os processamentos, pois o manuseio das nuvens terrestres originais nos *softwares* utilizados, como o *CloudCompare*, era muito ineficiente e longo. Após sub amostrar as nuvens terrestres utilizando o método *Octree* do *software CloudCompare* ao nível 12 (CLOUDCOMPARE, 2015), as nuvens terrestres resultantes foram unidas e o produto resultante foi uma nuvem de pontos com aproximadamente 71 milhões de pontos. Para facilitar o manuseio da nuvem total obtida, realizou-se mais uma subamostragem pelo método *Octree* ao nível 8, resultando em uma nuvem total terrestre de 229902 pontos.

Para classificar a nuvem total terrestre em pontos de terreno e pontos de vegetação, utilizou-se um algoritmo que realiza a filtragem de densificação progressiva ATIN (AXELSSON, 2000) através da ferramenta *lasground* do *LAStools*. Esta classificação foi necessária para se obter somente os pontos de terreno e gerar um MDT, para, posteriormente auxiliar no referenciamento altimétrico entre a nuvem terrestre e nuvem aérea. Alguns pontos que representam vegetação foram classificados como terreno, assim, a remoção desses pontos foi realizada manualmente a fim de se obter somente os pontos de terreno. Para gerar o MDT foi realizada uma interpolação TIN dos pontos através do método do vizinho mais próximo, implementado na ferramenta *las2dem* do *LAStools*. Dois produtos foram obtidos através dos processamentos dos dados SVLT: a nuvem total terrestre sub amostrada e o MDT terrestre. O Fluxograma para esta etapa é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma do processamento dos dados SVLT.



a) processamento para se obter nuvem terrestre total sub amostrada. b) processamento para se obter MDT (SVLT).

Fonte: Autora, 2020.

4.2 Processamento dos Dados SVLA

O processamento dos dados SVLA se inicia com a união das nuvens aéreas, de forma a se obter uma nuvem aérea total. Como foram realizados dois voos para coletar os dados, foram obtidos dois conjuntos de dados SVLA: um conjunto de dados obtidos a uma altura de voo de 900 m e outro a uma altura de voo de 2000 m. O processamento foi efetuado de maneira semelhante para os dois conjuntos de dados, com exceção da resolução do MDT e CHM. Para enfocar as análises na área de estudo, foi realizado o recorte para as duas nuvens aéreas totais considerando as coordenadas dos limites da área de estudo através da ferramenta *lasclip* do *LAStools*.

4.2.1 Geração do Modelo Digital de Terreno (MDT)

Para realizar a geração do MDT é necessário classificar os pontos em “pontos de terreno” e “pontos de vegetação” e realizar o adensamento dos pontos de terreno posteriormente. Segundo um estudo de Martins Neto (2016), o filtro ATIN e o filtro de Kraus

& Pfeifer apresentam desempenhos semelhantes quanto aos valores de cota mínimo e máximo, assim como resíduos, porém o filtro ATIN apresentou curvas de nível com menores ruídos. O MDT oriundo deste filtro foi o mais indicado para as outras fases do processamento de dados ALS na obtenção de variáveis dendrométricas.

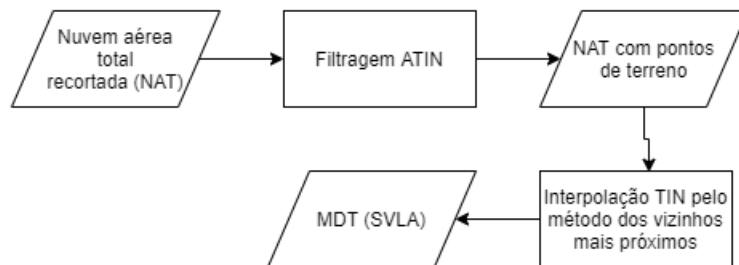
Como o projeto em questão trata uma área de floresta tropical sem áreas construídas, o algoritmo ATIN implementado na ferramenta *lasground* torna-se suficiente para a filtragem, devido às suas características como mostra a análise dos resultados obtidos pelos testes realizados para diferentes algoritmos de filtragem realizados por Căţeanu e Arcadie (2017). No trabalho de Căţeanu e Arcadie (2017), os seguintes algoritmos foram aplicados para a geração de MDT em uma área montanhosa e com cobertura densa de vegetação: *Lasground_new*, *Lasground*, *MLS*, *SMRF*, *ETEW*, *Mongus & Zalik*, *MCC*, *Kraus & Pfeifer*, e *BCAL*. Após analisar o RMSE, considerando todos os pulsos LASER retornados e também somente os últimos pulsos LASER retornados, o algoritmo *lasground* apresentou o segundo melhor resultado, conforme citado na seção 2.5.2 desse estudo.

Após a filtragem obtém-se os dados classificados em vegetação e terreno, e, em seguida, é realizada a interpolação TIN dos dados através do método do vizinho mais próximo implementado na ferramenta *grid_terrain* do Software R (ROUSSEL et al., 2018) para a geração de uma malha regular, que corresponde ao MDT. O arquivo MDT, resultante dos dados obtidos a uma altura de 900 m, foi gerado com 50 cm de resolução, enquanto o MDT resultante dos dados obtidos a uma altura de 2000 m foi gerado com 2 m de resolução.

O controle de qualidade do MDT gerado pelo processamento dos dados SVLA será realizado pela diferença de altitude dos pontos de apoio obtidos em campo, por rastreamento GNSS, e os pontos correspondentes localizados nas nuvens de pontos dos dois voos realizados. As altitudes dos pontos correspondentes são obtidas através interpolação das altitudes no MDT correspondentes às coordenadas planimétricas (X e Y) dos pontos de apoio. Após o algoritmo interpolar as altitudes correspondentes às coordenadas planimétricas dos pontos de apoio no MDT, é realizado o cálculo da diferença das elevações para esses pontos, e então, é possível calcular o RMSE para os pontos de apoio. O controle de qualidade foi realizado para os dois MDTs obtidos: MDT (900 m) e MDT (2000 m). A partir deste momento, será feita a distinção dos dados SVLA mencionando a altura de voo em que eles foram obtidos. O algoritmo que interpola as altitudes nos dados SVLA, correspondentes aos pontos de apoio, e calcula as diferenças de altitude, está implementado na ferramenta *lascontrol* do *LAStools*. Devido à densidade da vegetação da área de estudo, não foi possível realizar o rastreamento GNSS de pontos de apoio dentro da área do Plot 6. Então, foram

rastreados pontos de apoio na borda da Reserva Ponte Branca, de forma que fosse possível realizar um controle de qualidade prévio para o MDT gerado para a área. O fluxograma do processamento para geração do MDT a partir dos dados SVLA é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma dos processamentos para se obter o MDT (SVLA).



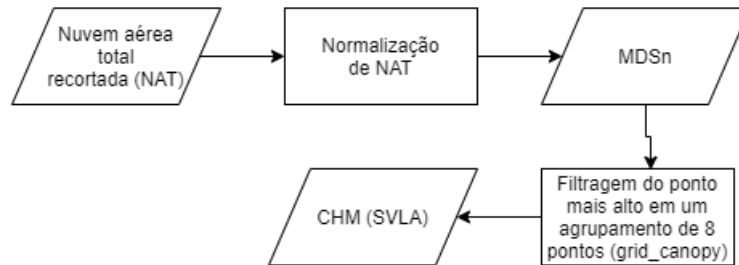
Fonte: Autora, 2020.

4.2.2 Geração do Modelo de Altura de Dossel (CHM)

Para se obter o CHM, ou Modelo Digital de Superfície Normalizado, é necessário que seja feita a normalização da nuvem de pontos aérea previamente. A normalização consiste na subtração do MDS pelo MDT, de forma que os pontos classificados como pontos de terreno (MDT) passem a ter altitude nula (HYYPÄ et al., 2008; VAN LEEUWEN et al., 2010). Os modelos são grades regulares (raster), e a normalização consiste em substituir a altitude de cada ponto (coordenada Z) com sua altura acima do terreno, conforme citado na seção 2.5.4 desse estudo. A geração de uma nuvem de pontos normalizada está implementada na função *lasnormalize* do pacote *lidR* (ROUSSEL et al., 2018) e na função *lasheight* do *LAStools*. Após gerar a nuvem de pontos normalizada, é necessário realizar uma filtragem de forma que o ponto mais alto de um agrupamento de 8 pontos próximos seja mantido. Esta filtragem é realizada através de um algoritmo para cálculo de modelo de superfície digital, com base em um método de varredura dos pontos: para cada pixel da varredura de saída, a função atribui a altura do ponto mais alto. O ajuste do subcírculo substitui 8 pontos pelo ponto mais alto desta vizinhança. Isso permite a emulação virtual do fato de que um ponto *LASER* não é um ponto em si, mas de um disco. Esse ajuste densifica a nuvem de pontos e o modelo de cobertura resultante é mais suave e contém menos 'cavidades' e pixels vazios. Este algoritmo está implementado na ferramenta *grid_canopy* no pacote *lidR* (ROUSSEL et al., 2018). O operador pode escolher a resolução em que salvará o CHM, caso o formato escolhido seja o formato raster. O modelo de CHM permite a extração de variáveis dendrométricas (altura da

árvore, diâmetro da copa (DC), e área da copa (AC)) para as árvores dominantes, as quais foram selecionadas na região de estudo. A geração do CHM foi realizada para os dados SVLA obtidos para os dois voos sobre a área de estudo. A Figura 19 apresenta o fluxograma dos processamentos para se obter o CHM.

Figura 19 – Fluxograma dos processamentos para se obter o CHM.



Fonte: Autora, 2020.

4.3 Integração dos Dados SVLA e SVLT

Após obter a nuvem de pontos total subamostrada, pelo processamento dos dados SVLT, e a nuvem de pontos recortada, pelo processamento dos dados SVLA (900 m), é necessário selecionar pontos homólogos entre estas nuvens (SVLA e SVLT) de forma que seja possível efetuar os referenciamentos planimétrico e altimétrico da nuvem terrestre com a nuvem aérea. Foram selecionados apenas os dados SVLA pós processados obtidos à uma altura de voo de 900 m, devido à maior densidade de pontos nestas nuvens. Ao comparar as nuvens de pontos obtidas pelo SVLA, notou-se que as nuvens obtidas à altura de 900 m mantiveram uma densidade de pontos superior às nuvens de pontos obtidas à altura de 2000 m. Como o estudo tem como objetivo extrair variáveis dendrométricas, quanto maior a densidade de pontos, maior é o detalhamento das feições localizadas na área de estudo.

Paris et al. (2017) utilizou o delineamento das copas das árvores de maior altura para integrar os dados terrestres e aéreos obtidos em uma floresta boreal. No estudo em questão, foram consideradas as copas das árvores dominantes para seleção dos pontos de apoio. Os dados SVLA obtidos não captaram as feições dos troncos das árvores, enquanto os dados SVLT captaram os troncos e parcialmente as copas das árvores. Os pontos homólogos foram determinados visualmente através de feições similares. Inicialmente foram selecionadas as copas das árvores dominantes na nuvem SVLA. Foi escolhida uma amostra de 30 pontos homólogos, localizados nos troncos correspondentes às bases das copas das árvores dominantes. Para cada árvore selecionada, foram medidos 3 pontos na copa de uma árvore

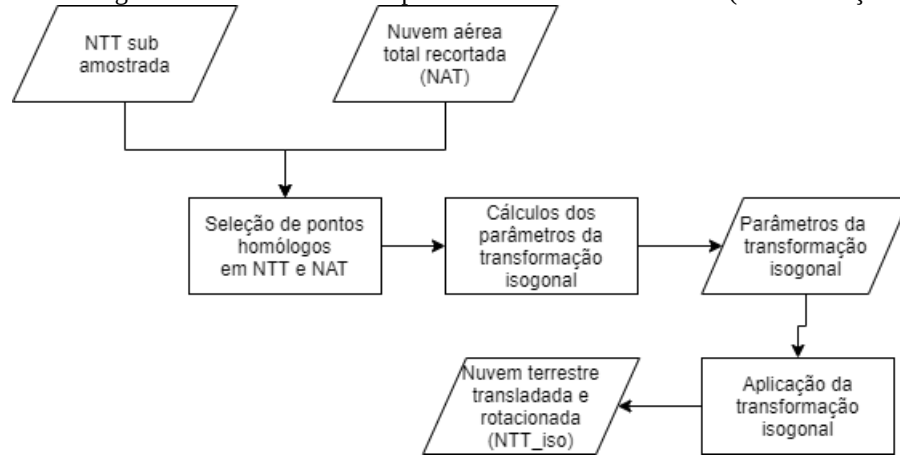
pré-identificada na nuvem SVLA e 3 pontos na base da copa da mesma árvore no conjunto de dados SVLT. Foi calculada a média das coordenadas dos 3 pontos selecionados, de forma a se obter as coordenadas planimétricas para dois pontos homólogos correspondentes à mesma copa, num na nuvem SVLA e outro na nuvem SVLT. Foi então feita uma verificação através do cálculo da distância entre os pontos selecionados nos dados SVLT e um ponto de referência nos dados SVLT, sobre o qual havia certeza da localização nos dados SVLA. Através da conferência do cálculo da distância entre esses pontos e o ponto de referência, foi possível selecionar uma amostra de 6 pontos que apresentaram resíduos da diferença de distância menores do que 50 cm. Esses pontos foram considerados como pontos aceitáveis, e assim foram considerados como pontos de apoio comuns a ambas as nuvens.

4.3.1 Referenciamento Planimétrico (2D)

Após a seleção de pontos comuns nas nuvens terrestre e aérea e a filtragem dos seis melhores pares de pontos, foi realizado o cálculo dos parâmetros para as transformações isogonal e de corpo rígido. Para a transformação isogonal foram calculados um fator de escala, duas translações, e um ângulo de rotação. Já para a transformação de corpo rígido foram calculadas duas translações e uma rotação. Para realizar essa transformação é necessário selecionar ao menos dois pontos conhecidos em ambos os sistemas. Se mais de dois pontos de controle estiverem disponíveis, pode-se obter uma solução com um melhor resultado ao aplicar o método dos mínimos quadrados (WOLF, 2000). Ao obter os parâmetros, as transformações foram aplicadas à nuvem terrestre subamostrada, resultando em uma nuvem transladada e rotacionada por uma transformação de corpo rígido e outra nuvem transladada, rotacionada, e com uma aplicação de escala pela transformação isogonal. Para a transformação isogonal a matriz peso das observações foi considerada como identidade e os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 5. Alguns testes foram feitos com o algoritmo ICP no software CloudCompare, no entanto, o algoritmo não retornou um resultado satisfatório, o que enfatizou a necessidade de se realizar um referenciamento medindo-se manualmente os pontos comuns e realizando o cálculo dos parâmetros da transformação 2D. A transformação 2D foi considerada ao invés de uma transformação 3D, pois as nuvens de pontos terrestres foram previamente referenciadas entre elas e o sistema de coordenadas já se encontrava configurado para o mesmo sistema métrico das coordenadas dos dados SVLA (metros). Também, é importante ressaltar que o SVLT foi nivelado para todas as estações em

que foi estacionado para realizar as varreduras. A Figura 20 apresenta o fluxograma do referenciamento planimétrico realizado através da transformação isogonal.

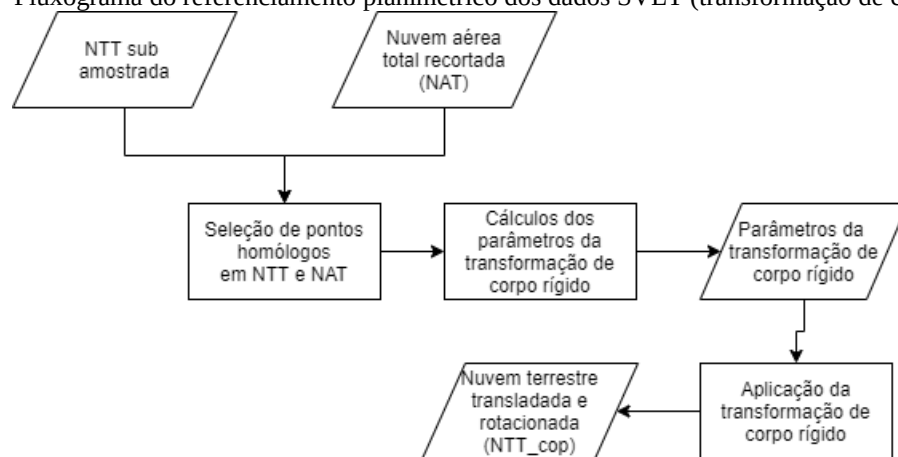
Figura 20 – Fluxograma do referenciamento planimétrico dos dados SVLT (transformação isogonal).



Fonte: Autora, 2020.

Os parâmetros da transformação de corpo rígido foram calculados considerando os 6 pontos de apoio selecionados e, posteriormente, considerando somente 5 pontos de apoio dos 6 iniciais, eliminando um dos pontos que apresentou altos resíduos. Os parâmetros iniciais utilizados no cálculo da transformação de corpo rígido foram os parâmetros calculados na transformação isogonal (X_0 , Y_0 , e ângulo de rotação). Foram obtidos os parâmetros de transformação de corpo rígido (um ângulo de rotação e duas translações) e aplicou-se a inversa da transformação às coordenadas dos pontos dos dados SVLT, resultando em coordenadas planimétricas referenciadas no mesmo sistema dos dados SVLA. Para conferência do referenciamento planimétrico foi realizada a conferência visual da compatibilidade entre as nuvens obtidas após o referenciamento planimétrico e a nuvem aérea recortada (900 m). Para realizar essa conferência foram selecionadas algumas árvores principais e comparou-se visualmente se o delineamento das copas e troncos estavam compatíveis com àqueles dos dados SVLA (orientação e posição planimétrica). As nuvens de pontos (SVLA e SVLT) se apresentaram orientadas em planimetria, sendo, ainda, necessário realizar uma translação altimétrica para que as nuvens fossem combinadas. O referenciamento altimétrico é descrito na seção 4.3.2. A Figura 21 apresenta o fluxograma do referenciamento planimétrico utilizando a transformação de corpo rígido.

Figura 21 – Fluxograma do referenciamento planimétrico dos dados SVLT (transformação de corpo rígido).

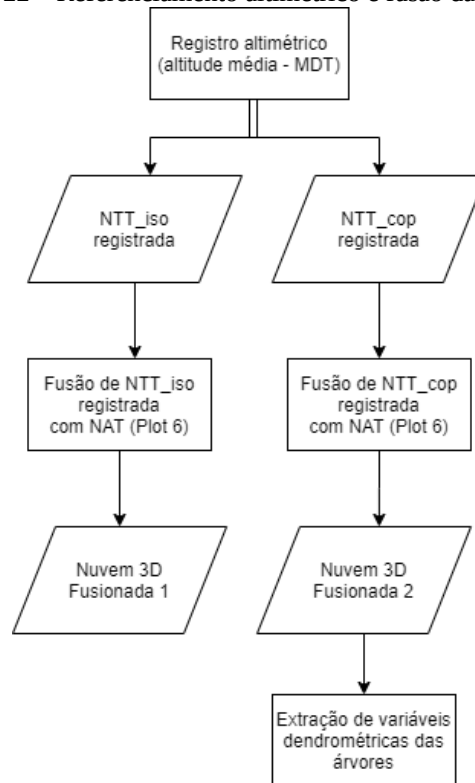


Fonte: Autora, 2020.

4.3.2 Referenciamento Altimétrico (1D)

Utilizando o MDT obtido no processamento dos dados SVLA e dos dados SVLT, é possível obter a diferença das altitudes dos pontos homólogos em ambos MDTs. Para realizar o cálculo dessa diferença das altitudes, primeiramente, é realizada a localização de pontos homólogos, sendo, então, possível obter a diferença de altitude para esses pontos. A localização dos pontos com coordenadas planimétricas homólogas é realizada através do método da 'distância do vizinho mais próximo'. O algoritmo busca os pontos homólogos ou mais próximos no MDT de referência (SVLA) e no MDT de estudo (SVLT) e realiza o cálculo da diferença de altitude entre eles. Calcula-se, então, a média destas diferenças de altitude, e esta média é utilizada como valor de translação para as altitudes, de forma que a nuvem terrestre seja transladada para o mesmo referencial altimétrico da nuvem aérea. Após a nuvem terrestre estar no mesmo sistema que a nuvem aérea, é possível realizar a fusão entre as nuvens e obter um produto 3D fusionado, do qual poderemos obter as variáveis dendrométricas de árvores selecionadas. A fusão entre as nuvens é realizada através da união das nuvens, ou seja, os pontos de ambas as nuvens são mantidos e armazenados como uma única nuvem de pontos 3D. A Figura 22 apresenta o processo para realizar o referenciamento altimétrico e realizar a fusão das nuvens.

Figura 22 – Referenciamento altimétrico e fusão das nuvens.



Fonte: Autora, 2020.

O controle de qualidade da fusão dos dados SVLA e SVLT foi efetuado através da comparação visual de seções dos modelos fusionados. Não foram utilizados pontos de verificação devido à dificuldade de se encontrar pontos homólogos manualmente na nuvem terrestre final (combinação das 27 nuvens terrestres) que representam uma região de floresta densa. Os pontos homólogos (pontos localizados ao centro dos troncos e ao centro das bases das copas de árvores principais) selecionados para cálculo dos parâmetros das transformações foram obtidos através da análise das nuvens terrestres separadamente, ou seja, a visualização para cada uma das nuvens de pontos era ativada ou desativada, de forma que fosse possível reduzir a obstrução de algumas feições, por exemplo.

4.4 Extração das Variáveis Dendrométricas

Hopkinson et al. (2004), comparou a obtenção de variáveis dendrométricas por meio da varredura *LASER* com os métodos tradicionais de campo e constatou que utilizar a varredura *LASER* em áreas de floresta é uma prática útil na estimação das métricas florestais, como a altura das árvores, DAP, densidade do tronco, e volume, e apresentou resultados aceitáveis quando comparado às técnicas mais tradicionais.

Martins Neto (2016), utilizou as variáveis DAP e altura total da árvore em seu estudo. Os resultados apontaram que há uma alta correlação entre os valores calculados pelos métodos tradicionais e pelo *LASER* em relação às variáveis DAP e altura total. Para o estudo em questão, as variáveis dendrométricas utilizadas foram DAP, DC, área da copa (AC) e altura das árvores (H). Neste trabalho, a única variável medida em campo foi o DAP. O DAP foi medido para 5 árvores principais, que foram consideradas como árvores de referência para a extração das outras variáveis dendrométricas. O DAP também foi extraído através de mensuração manual interativa nos troncos das árvores de referência utilizando a nuvem 3D fusionada. Assim, foi feita a comparação entre o DAP medido em campo e o DAP obtido pela mensuração no modelo fusionado. As variáveis AC e H foram extraídas através do produto CHM (900 m). Para realizar a extração da variável AC realizou-se a segmentação das copas manualmente no *software* QGIS e para a extração da variável H foram selecionados manualmente os pontos mais altos das copas das árvores de referência através da ferramenta de informação do *software* QGIS.

A extração destas variáveis, por meio dos produtos *LASER* fusionados (SVLA e SVLT) tem a finalidade de obter resultados mais precisos, uma vez que utilizar apenas os dados SVLA permite uma estimativa precisa da altura da árvore, mas não é efetivo para estimar o DAP das árvores, em comparação com os dados SVLT. Em contraste, os dados SVLT subestimam a altura das árvores, pois os pulsos terrestres raramente atingem o topo das copas mas fornecem importantes informações sobre a estrutura abaixo do dossel (PARIS et al., 2015).

O DC foi estimado através de AC utilizando a Equação 29:

$$DC = \sqrt{(AC * 4)/\pi} \quad (29)$$

Para comparar o DC estimado, utilizou-se o modelo de regressão proposto por Leão et al. (2017): $DC = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 H$, representado pela Equação 28, descrita na seção 2.6. Este modelo de regressão considera as variáveis DAP e H, para estimar o DC. Esse estudo utilizou apenas uma pequena amostra (5 árvores) para realizar as análises dos resíduos, ao aplicar esse modelo de regressão. As comparações entre os valores obtidos são apresentadas no Capítulo 5, seção 5.4. O modelo de regressão foi avaliado através das seguintes equações:

$$R^2_{ajust} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \cdot \frac{SQR}{SQT} \quad (30)$$

$$Syx\% = \left(\frac{Syx}{\bar{y}} \right) \cdot 100 \quad (31)$$

$$\text{Resíduo} = \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \quad (32)$$

Onde:

p = número de coeficientes no modelo;

n = número de observações;

SQR = soma de quadrado de resíduos;

SQT = soma de quadrado total;

$\hat{y}$ = valor estimado de cada observação;

$\bar{y}$ = média aritmética real da variável dependente;

y = valor real de cada observação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos da parte experimental realizada, ou seja, os resultados obtidos após o processamento dos dados SVLT e SVLA brutos, do referenciamento dos dados SVLT pós processados para o mesmo sistema de referência dos dados SVLA pós processados, da fusão dos dados SVLA e SVLT registrados e pós processados, e do controle de qualidade dos dados fusionados. Apresenta, também, as variáveis dendrométricas extraídas dos dados SVLT e SVLA.

5.1 Processamento dos Dados SVLT

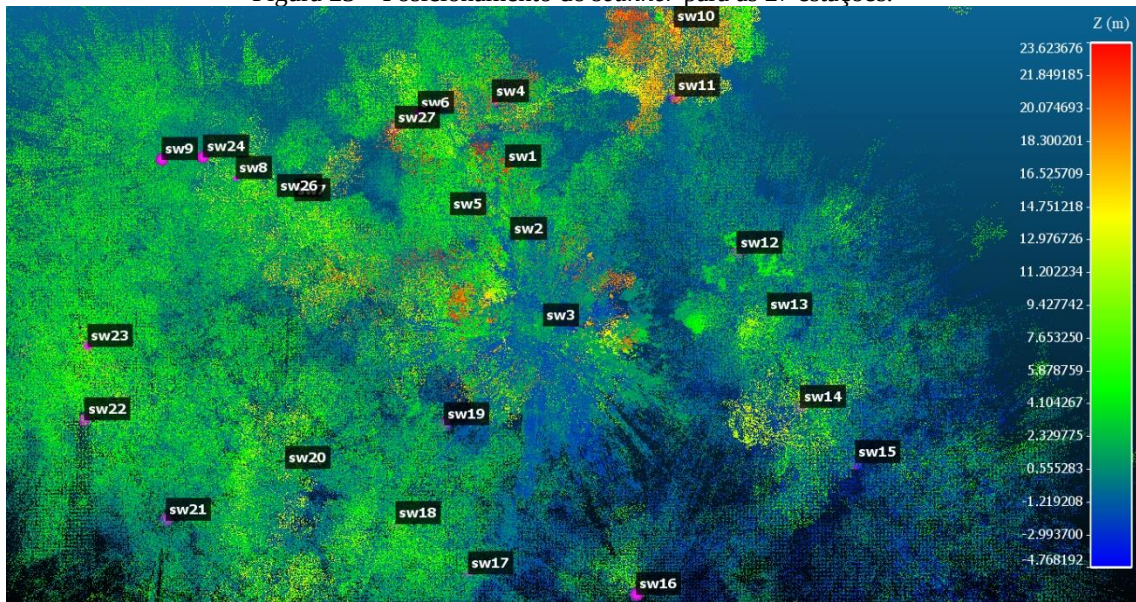
Nesta seção são discutidos os resultados obtidos na geração dos produtos através do processamento dos dados SVLT. Foram realizados os seguintes procedimentos: referenciamento das nuvens SVLT, subamostragem dos dados SVLT, filtragem separando pontos do terreno de pontos da vegetação, eliminação de ruídos, e identificação dos troncos.

5.1.1 Referenciamento dos dados SVLT

Os dados SVLT foram obtidos por varredura a LASER da área de estudo utilizando o *Scanner Leica ScanStation P40* pela equipe do FGI. O equipamento foi estacionado em 27 estações, posicionadas nos limites e em pontos internos da área de estudo, conforme Figura 23. As nuvens foram nomeadas como SW1 a SW27 e as estações em que o *Scanner* foi posicionado para realizar a coleta das nuvens foram nomeadas como SW1 a SW27, de forma que o número da estação seja correspondente ao número da nuvem que foi obtida. As nuvens SW24 e SW25 foram coletadas pelo *Scanner* posicionado na mesma estação (SW24). As esferas de referência foram posicionadas durante o escaneamento terrestre, para que pudessem ser detectadas e utilizadas como pontos de apoio para registrar as vinte e sete nuvens de pontos terrestres de forma que se obtivesse uma nuvem total em um referencial único. O referencial de cada estação foi configurado como um sistema de referência local tridimensional (X, Y, e Z), sendo as coordenadas dos pontos obtidas em metros. A resolução do *Scanner* foi configurada para obter uma densidade alta de pontos. Para este *Scanner* especificamente a densidade alta é obtida quando, a 10 metros da posição do *Scanner*, se obtém pontos com espaçamento de 6,3 mm entre eles.

As principais espécies de árvores (Peroba, Amendoim e Jatobá) localizadas na área foram identificadas por números. A Figura 24 apresenta uma porção da primeira nuvem de pontos terrestre obtida, onde pode-se notar uma esfera de referência apoiada em um bastão, e um número de identificação da árvore posicionado em uma árvore. Esta primeira varredura contou com a captura de imagens da câmara *PhaseOne IXA 180* integrada ao scanner *LASER*, e, por esta razão, os pontos da nuvem terrestre também possuem atributos de cor (RGB).

Figura 23 – Posicionamento do scanner para as 27 estações.



Fonte: Autora, 2020.

O referenciamento das nuvens terrestres foi efetuado por El Issaoui (2018), integrante da equipe do FGI. Para se realizar o referenciamento, foi necessário efetuar uma seleção do raio das esferas (72,5 mm) através da função *Target Registration* do *Software Leica Cyclone*, porém, devido ao elevado número de nuvens terrestres e a alta densidade de dados (área de cobertura densa de vegetação), algumas nuvens não foram registradas corretamente. A fim de se obter um referenciamento de maior qualidade para todas as nuvens terrestres, foi realizada a correspondência manual pelo operador. Essas correções foram feitas visualmente, ajustando a rotação da nuvem de pontos em torno do eixo z e a translação em todas as direções, além de selecionar os troncos como alvos de referência. Após os últimos ajustes, as nuvens apresentaram apenas 5 cm de diferença entre as mesmas e o referenciamento foi completado com sucesso (EL ISSAOUI, 2018).

Figura 24 – Esfera e identificação de espécie de árvore em nuvem terrestre.



Fonte: Autora, 2020.

5.1.2 Subamostragem dos Dados SVLT

Para realizar a subamostragem dos dados SVLT utilizou-se a ferramenta *Subsample* do software *CloudCompare*. Esta ferramenta oferece três opções de reamostragem: *Space*, *Random*, e *Octree*, descritos no Capítulo 2. A subamostragem foi realizada para cada uma das 27 nuvens de pontos obtidas pelo SVLT. O método *Space* apresentou uma maior perda das características da nuvem de pontos, como delineamento das feições (troncos, copas), por exemplo, enquanto os outros métodos conservaram as características. O método *Random* utiliza pontos aleatórios para que se realize a redução da densidade dos dados, e não conservou as características das nuvens originais de forma precisa, embora melhor que o método *Space*.

O método *Octree* manteve as feições e características da nuvem original e, aplicando-se o nível 12 na subamostragem, foi possível obter uma densidade de pontos, em média, nove vezes menor que da nuvem original. O nível 12 corresponde ao nível de subdivisão do método *Octree* que subamostra a nuvem de pontos. Quanto mais alto o nível da subdivisão (sendo 1 o nível mais alto), menores serão as células de divisão e mais pontos serão mantidos. A comparação entre a nuvem de pontos original terrestre SW1 (25.475.129 milhões de pontos) e a nuvem de pontos sub amostrada (2.796.334 milhões de pontos) é apresentada na Figura 25. Na Figura 25 pode-se notar que a altura dos pontos varia de -2,525 m a 23,032 m. Os pontos em alturas mais baixas são representados pela cor azul, enquanto os pontos em alturas mais altas são representados pela cor vermelha. É possível notar na Figura 25 que, após realizar a

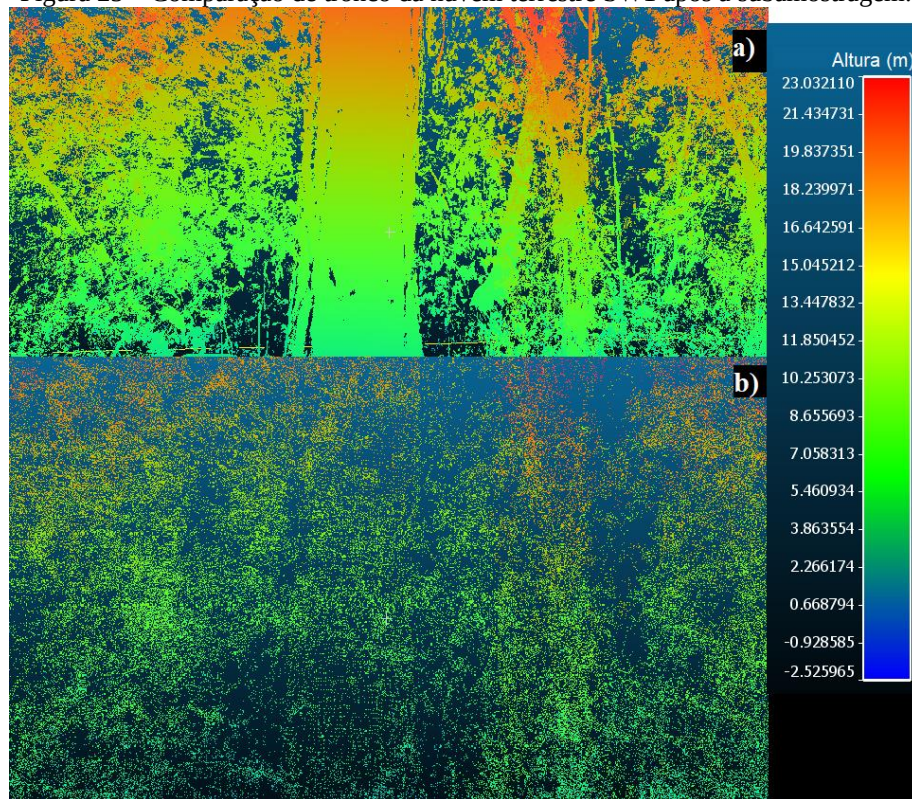
subamostragem das nuvens de pontos, perdeu-se a qualidade do delineamento dos troncos, dificultando a extração das variáveis dendrométricas, ao utilizar apenas uma nuvem de pontos. Dessa forma, torna-se necessário utilizar um conjunto de nuvens subamostradas, para que se tenha mais pontos que representem as feições. Como foram obtidas 27 nuvens de pontos, é possível obter um detalhamento melhor das feições ao unir todas essas nuvens. Porém, ao utilizar apenas uma única de nuvem de pontos, recomenda-se utilizar a nuvem de pontos terrestre original, para manter o detalhamento e permitir maior precisão na extração de medidas. A Tabela 2 apresenta a quantidade de pontos para as nuvens originais e para as nuvens sub amostradas ao nível 12.

Tabela 2 – Quantidade de pontos (Nuvens Terrestres).

ID	Original (pontos)	Sub Amostrada (pontos)	Pontos Amostrados (%)
SW1	25.475.129	2.796.334	11
SW2	23.457.348	3.605.880	15
SW3	21.755.462	2.509.948	12
SW4	23.104.846	2.028.682	9
SW5	21.875.742	2.517.774	12
SW6	22.083.891	1.984.580	9
SW7	23.603.020	1.674.595	7
SW8	23.132.027	1.656.251	7
SW9	22.157.173	2.496.834	11
SW10	20.185.535	3.445.807	17
SW11	17.043.308	2.289.937	13
SW12	21.639.925	2.313.633	11
SW13	23.912.929	2.195.122	9
SW14	24.533.836	2.492.346	10
SW15	21.831.659	3.322.968	15
SW16	23.339.539	2.990.483	13
SW17	22.111.205	2.316.861	10
SW18	22.949.900	3.190.686	14
SW19	22.511.090	3.430.123	15
SW20	25.156.024	3.107.282	12
SW21	17.637.295	2.745.607	16
SW22	23.659.252	3.466.040	15
SW23	25.380.615	4.014.650	16
SW24	19.548.599	1.275.924	7
SW25	19.548.599	1.275.924	7
SW26	23.057.269	2.143.248	9
SW27	15.156.639	1.274.206	8

Fonte: Autora, 2020.

Figura 25 – Comparação de tronco da nuvem terrestre SW1 após a subamostragem.



(a) Nuvem terrestre original (SW1) e (b) Nuvem terrestre sub amostrada (SW1).

Fonte: Autora, 2020.

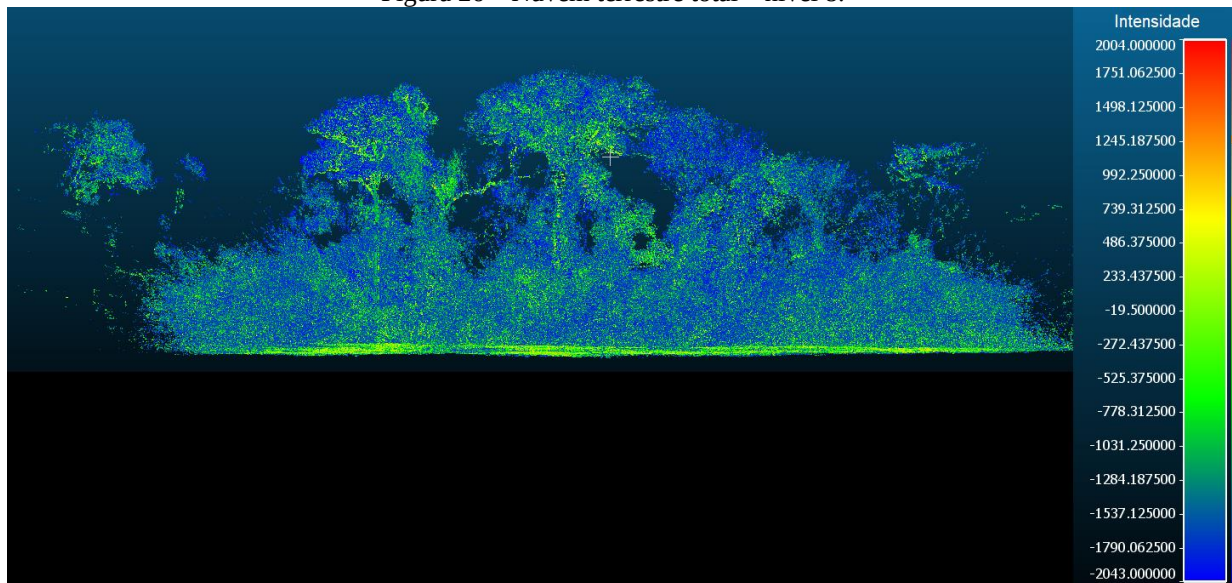
Como as nuvens terrestres foram previamente registradas, é possível trabalhar com o conjunto total das nuvens terrestres, após a subamostragem. Para realizar a junção das 27 nuvens terrestres registradas, de forma que elas resultassem em apenas uma nuvem, utilizou-se a função *merge* do software *CloudCompare*, que simplesmente cria um único arquivo com todos os pontos das nuvens integradas. A nuvem resultante, no nível 12 de subamostragem, contém o total de 68.561.725 pontos e é apresentada na Figura 26. As cores da nuvem terrestre total são definidas pela intensidade obtida para cada ponto e preservam as características das feições (troncos, copas, folhagens) das nuvens originais, ou seja, é possível identificar essas feições quando se visualiza a nuvem resultante.

Para realizar processamentos posteriores, realizou-se mais uma subamostragem da nuvem final através do método *Octree* ao nível 8, ou seja, foi aplicada uma nova subamostragem ao nível de subdivisão 8 para a nuvem resultante da integração de todas as nuvens subamostradas a um nível de subdivisão 12. A nuvem de pontos final apresentou 229.902 pontos. Esta nova subamostragem foi necessária para otimizar o tempo de carregamento das nuvens nos programas e também devido à limitação de 1,5 milhões de pontos do *Software LAStools*, na versão gratuita. Porém, recomenda-se utilizar uma

quantidade maior de pontos para facilitar e melhorar a precisão da extração de medidas, se possível.

A fim de se obter um outro produto, para posteriores extrações das variáveis dendrométricas, realizou-se um recorte aproximado a altura de peito de 1,30 metros da nuvem terrestre total, utilizando a ferramenta *Crop* do *CloudCompare*, para recortar seções. A ferramenta permite selecionar a altura máxima e realizar o recorte de uma seção. Com os pontos da nuvem nesta altura será possível extrair o diâmetro à altura de peito (DAP), utilizado como um parâmetro importante para compor um inventário florestal. A extração da variável DAP é apresentada na seção 5.4 do Capítulo 5.

Figura 26 – Nuvem terrestre total – nível 8.



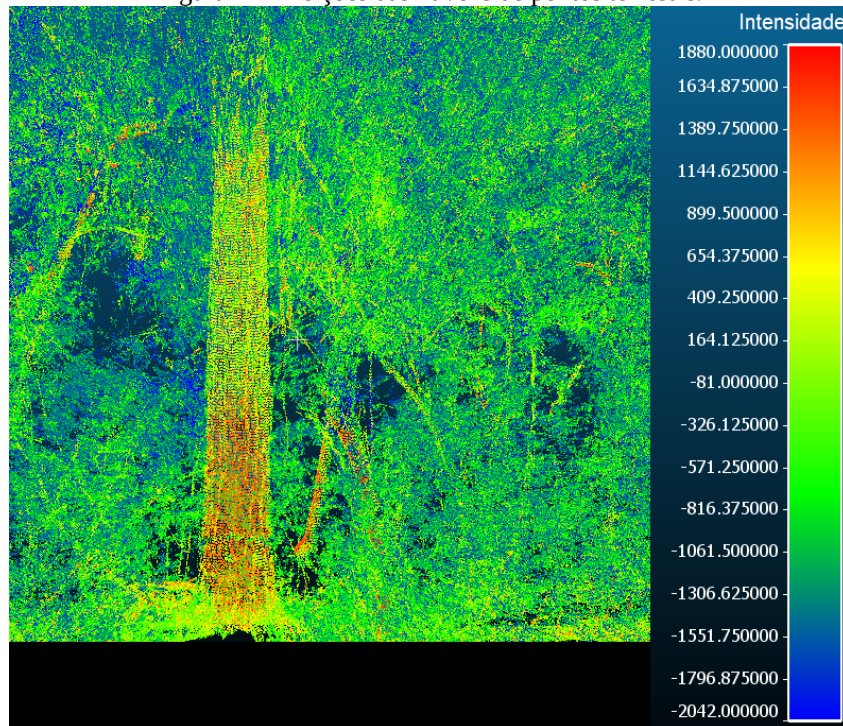
Fonte: Autora, 2020.

5.1.3 Filtragem dos Dados SVLT

Mesmo com a subamostragem da nuvem de pontos, que diminuiu a densidade e quantidade de pontos, ainda é necessário realizar a classificação dos pontos em pontos de terreno e pontos de vegetação, pois, ao visualizar a nuvem de pontos terrestre subamostrada (Figura 26), nota-se que ela está classificada de acordo com a intensidade dos pontos. Na Figura 27, pode-se notar os troncos e a cobertura densa de vegetação característica em áreas de florestas tropicais. Os troncos são representados pelas cores laranja e amarela, enquanto a vegetação é representada pelas cores verde e azul. Devido à cobertura densa da floresta nativa, o processo de filtragem é desafiador.

Realizou-se a classificação dos pontos em terreno e não terreno, assim como a remoção de alguns ruídos através de algoritmos implementados nas ferramentas *lasground* do software *LAStools*. Para a classificação utilizou-se a função *-not_airborne*, que permite que todos os retornos sejam considerados, pois por default o algoritmo *lasground* trabalha apenas com os últimos retornos. O resultado da classificação é apresentado na Figura 28.

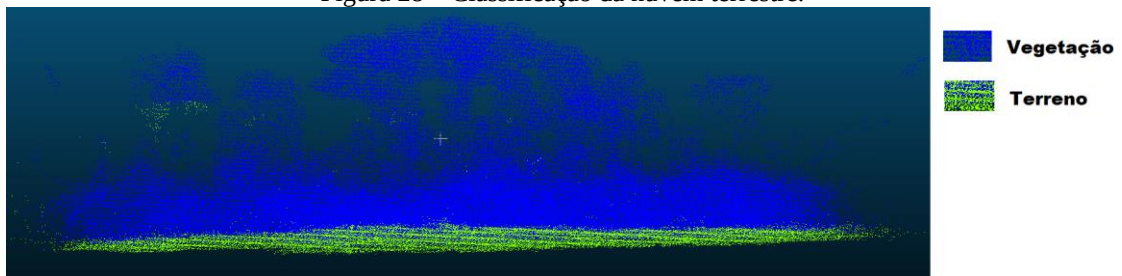
Figura 27 – Feições das nuvens de pontos terrestre.



Fonte: Autora, 2020.

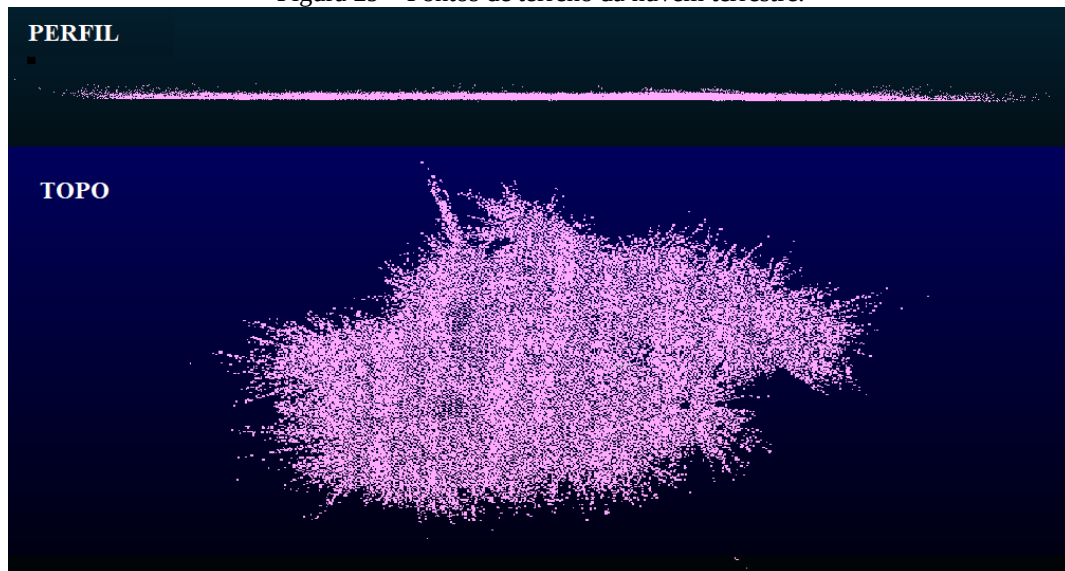
Pode-se notar na Figura 28 que a cor azul representa a vegetação, enquanto a cor verde apresenta pontos no terreno e pontos não identificados pelo algoritmo implementado em *lasground*. Nota-se que alguns pontos que correspondem à vegetação foram classificados como pontos de terreno. Estes pontos foram removidos manualmente após a separação dos pontos de terreno e pontos de vegetação através da ferramenta de recorte do Software *CloudCompare*. O resultado é uma nuvem de pontos contendo somente os pontos de terreno, ou muito próximos, conforme é apresentado na Figura 29.

Figura 28 – Classificação da nuvem terrestre.



Fonte: Autora, 2020.

Figura 29 – Pontos de terreno da nuvem terrestre.



Fonte: Autora, 2020.

5.1.4 Identificação de Pontos Localizados nos Dados SVLT

A fim de identificar pontos coincidentes nos Dados SVLT e SVLA para posterior referenciamento e integração dos dados, foi selecionada uma amostra de troncos com diâmetros maiores e menores do que 10 cm para cada nuvem terrestre. Os diâmetros dos troncos selecionados foram medidos manualmente através da ferramenta “*Select 2 points and display segment information*” do *CloudCompare*. Essa ferramenta calcula a distância entre dois pontos. Bastou, então, selecionar dois pontos diametralmente opostos na circunferência de um tronco e realizar a medida do diâmetro. Ao identificar cada tronco na nuvem de pontos, foram coletadas as coordenadas locais de cada tronco, quando possível, por mais de um par de coordenadas, para assim se obter o centroide pela média das coordenadas do ponto.

A seleção dos pontos para o cálculo dos centroides dos troncos foi feita nas nuvens originais, para melhor visualização dos troncos com diâmetros menores. A maioria dos pontos

foram selecionados nos troncos, porém próximos a base das copas, de forma que fosse possível localizar os pontos correspondentes nos dados SVLA. Como se trata de uma área de floresta nativa e densa, os dados SVLA não registram os troncos; por isso, foram selecionados pontos no topo das copas nos dados SVLT, para que fosse possível encontrar esses mesmos pontos nos dados SVLA. As coordenadas medidas se encontram no sistema de referência local da nuvem terrestre (X, Y, Z) e em metros. Foi obtida uma amostra de 129 pontos nos dados SVLT, porém, a grande maioria desses pontos não foram capturados nos dados SVLA, restando apenas 30 pontos correspondentes. Dos 30 pontos correspondentes, apenas 6 pontos foram considerados como pontos aceitáveis, e assim foram considerados como pontos de apoio, conforme citado na seção 4.3.

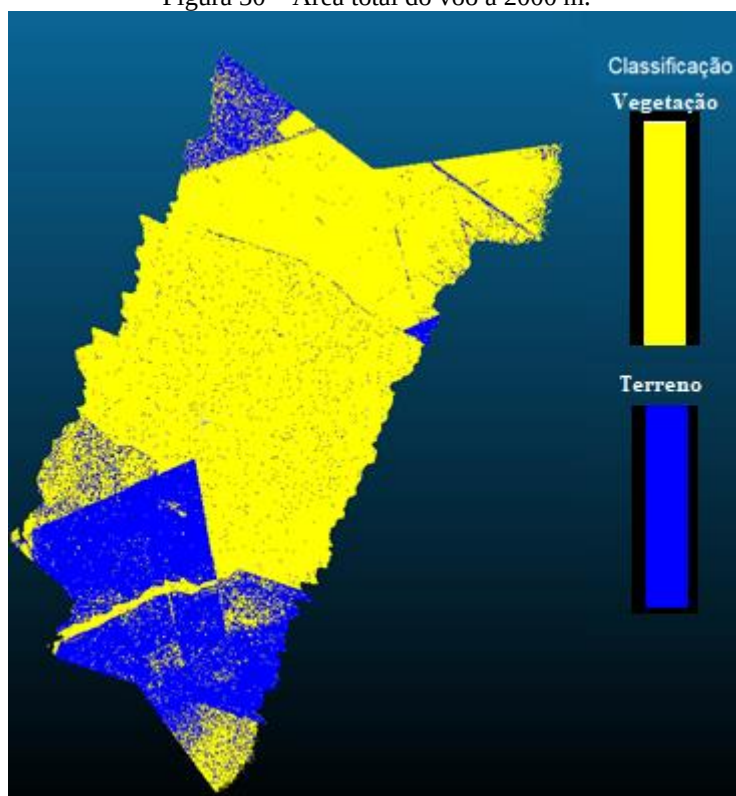
5.2 Processamento dos Dados SVLA

Nesta seção são apresentados os produtos e as respectivas discussões sobre os resultados obtidos com a utilização da nuvem de pontos aérea (SVLA). Foram realizados os seguintes procedimentos para a geração dos produtos: recorte dos dados SVLA para a área de estudo, filtragem separando pontos do terreno de pontos da vegetação, eliminação de ruídos, geração do MDT, e geração do CHM.

5.2.1 Filtragem dos Dados SVLA

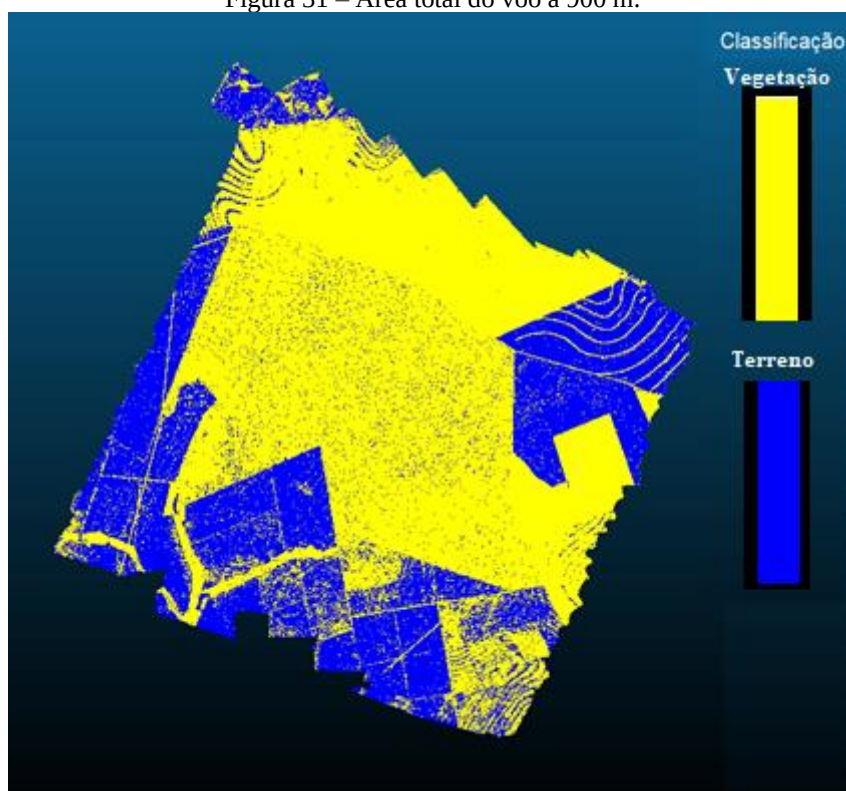
Conforme citado no Capítulo 3, seção 3.4, a Engemap forneceu duas coberturas de nuvens de pontos aéreas que compreendem a área de estudo. As nuvens aéreas foram obtidas através da varredura realizada pelo equipamento Riegl LMS – Q680i. A primeira varredura foi realizada a uma altura de voo de 2000 m (Figura 30) e retornou 3 nuvens de pontos aéreas. A segunda varredura foi realizada a uma altura de 900 m (Figura 31) e retornou 15 nuvens de pontos aéreas. Para otimizar o manejo das nuvens aéreas e gerar os produtos MDT e CHM, alguns filtros e classificações precisaram ser aplicados e serão abordados nas próximas seções. As nuvens de pontos aéreas foram obtidas com uma prévia classificação dos pontos. Conforme apresentado nas Figuras 30 e 31, os pontos estão previamente classificados em pontos pertencentes ao terreno e pontos pertencentes à vegetação. Os pontos em amarelo são pontos pertencentes à vegetação e os pontos em azul são pontos pertencentes ao terreno.

Figura 30 – Área total do voo a 2000 m.



Fonte: Autora, 2020.

Figura 31 – Área total do voo a 900 m.



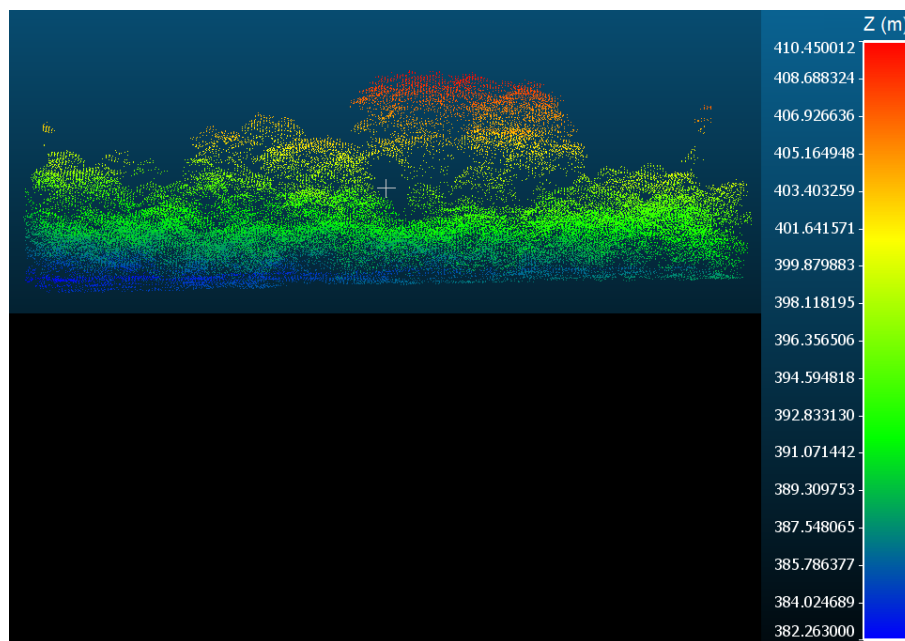
Fonte: Autora, 2020.

5.2.1.1 Recorte das Nuvens Aéreas

Para otimizar o manejo das nuvens aéreas e limitar a área das nuvens aéreas de acordo com a área de estudo (PLOT 6) , as duas nuvens aéreas (900 m e 2000 m) foram recortadas para apresentarem pontos localizados somente dentro da área de interesse, citada no Capítulo 3, Seção 3.1. Para tal, foi necessário obter as coordenadas de vértices do polígono que representa o PLOT 6 e utilizar estas coordenadas para o recorte realizado pela ferramenta *lasclip* do Software *LAStools*.

O recorte das nuvens aéreas obtidas a uma altura de voo de 900m foi realizado por Martins Neto (2018). Foi utilizada uma ferramenta que realiza o recorte através das coordenadas delimitadoras da área, ferramenta denominada *Cross Section* do software *CloudCompare*. O recorte foi realizado para cada uma das nuvens aéreas, que resultaram em pontos dentro da área de estudo. Após o recorte, as nuvens aéreas foram unidas através da ferramenta *Merge* do software *CloudCompare*. A nuvem aérea total para a altura de voo de 900 m é apresentada na Figura 32 e contém 58501 pontos. As cores da nuvem aérea são definidas pela altitude dos pontos através de um gradiente linear definido por padrão na ferramenta *Colors>Height Ramp* do *CloudCompare*.

Figura 32 – Visualização 3D do recorte dos dados SVLA (900 m).

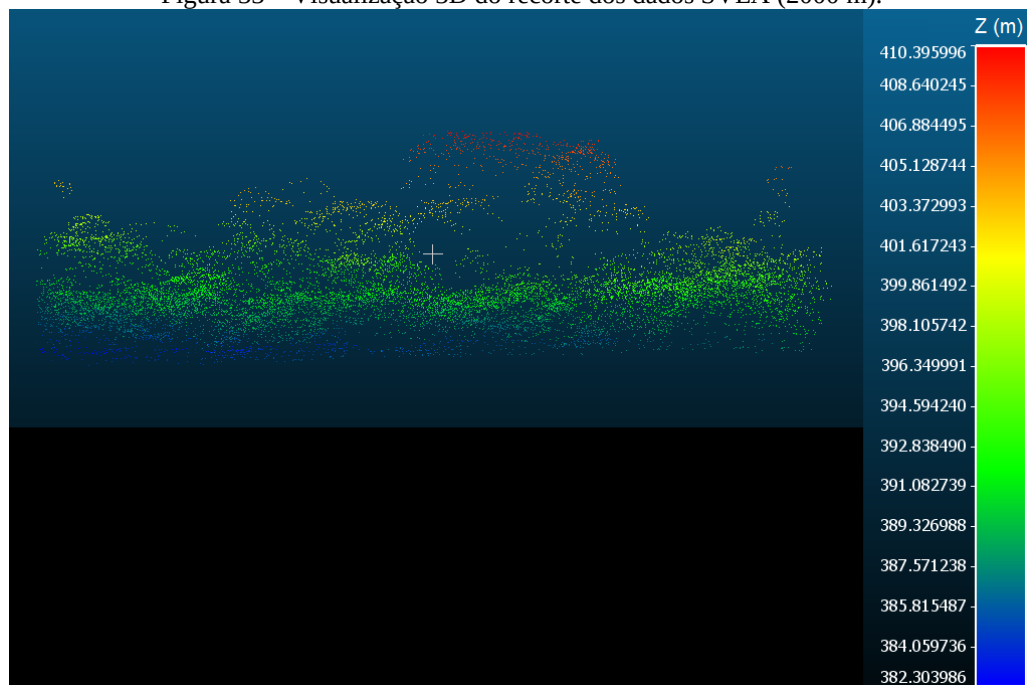


Fonte: Autora, 2020.

A nuvem área recortada de 900 m foi utilizada como referência para recortar cada uma das nuvens aéreas obtidas a uma altura de voo de 2000 m. A fim de selecionar somente os pontos localizados dentro da área de estudo, realizou-se o recorte utilizando as coordenadas do perímetro da área de estudo como referência, utilizando a ferramenta *lasclip* do *Software LAStools*. Em sequência, realizou-se a união das nuvens aéreas da mesma forma que foi feita para as nuvens aéreas obtidas a 900 m. A nuvem aérea total para a altura de voo de 2000 m é apresentada na Figura 33 e contém 12521 pontos, além de uma densidade média de 0,18 pontos/m³.

Como pode-se notar, a quantidade total de pontos da nuvem aérea obtida a 2000 m é menor do que a quantidade total de pontos da nuvem aérea obtida a 900 m que contém 58501 pontos e apresenta uma densidade média de 0,83 pontos/m³, portanto, é mais densa que a nuvem aérea (2000 m). A nuvem aérea (900 m) apresenta um detalhamento muito maior das feições (troncos, copas de árvores, folhagens) do que a nuvem aérea (2000 m).

Figura 33 – Visualização 3D do recorte dos dados SVLA (2000 m).



Fonte: Autora, 2020.

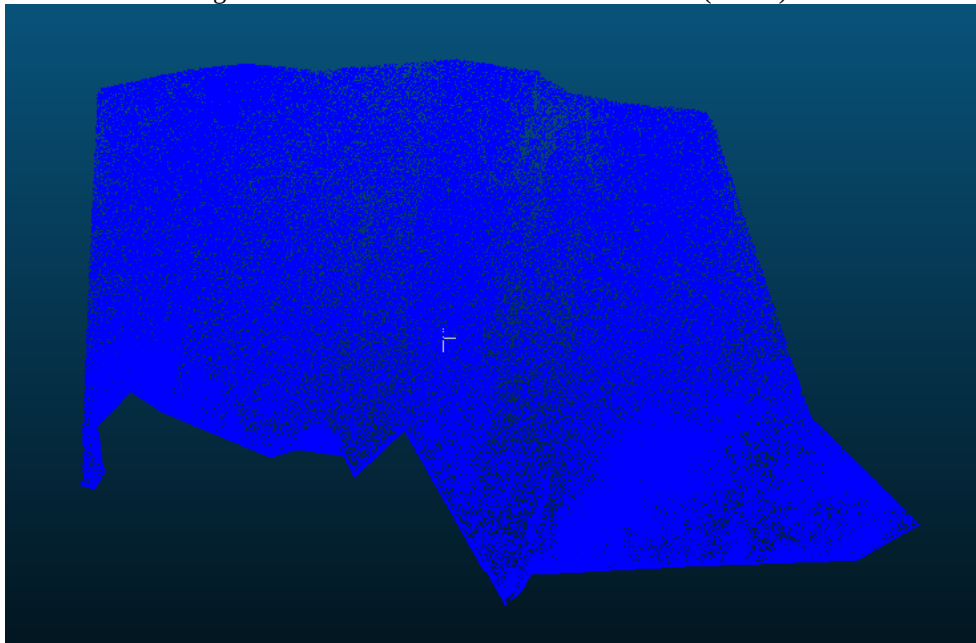
5.2.1.2 Filtragem dos Pontos de Terreno

Foi realizada a filtragem das nuvens aéreas para toda a área da Reserva Ponte Branca, de forma a separar os pontos de terreno dos pontos que não pertencem ao terreno. Essa etapa foi realizada utilizando a ferramenta *lasground* no software *LAStools*. Como a área de estudo

compreende a uma floresta nativa e densa, para garantir que os pontos de solo fossem obtidos, Berveglieri (2020) e Martins Neto (2018) realizaram vários testes com diferentes valores para os parâmetros do algoritmo, e os valores que apresentaram os melhores resultados foram os seguintes: o valor 11 para *step*, 0.5 para *bulge*, 0.5 para *spike*, 0.5 para *offset*, 0 para *stddev*, e filtragem ultra refinada através da opção *ultrafine*. Como resultado, obteve-se uma nuvem de pontos filtrada com os pontos referentes ao terreno.

Este processo foi aplicado para as duas nuvens aéreas (900 m e 2000 m). A Figura 34 apresenta os pontos de terreno após a filtragem para a nuvem aérea (900 m). Berveglieri et al. (2020) e Martins Neto (2018) realizaram o processo de filtragem dos pontos de terreno da nuvem aérea (900 m), considerando os pontos correspondentes à área da Reserva Ponte Branca, ou seja, a reserva que contém a área de estudo (PLOT 6), conforme Figura 12 do Capítulo 3, Seção 3.1.

Figura 34 – Pontos de terreno nos dados SVLA (900 m).



Fonte: Berveglieri et al. (2020) e Martins Neto (2018).

5.2.2 Controle de Qualidade das Nuvens Aéreas

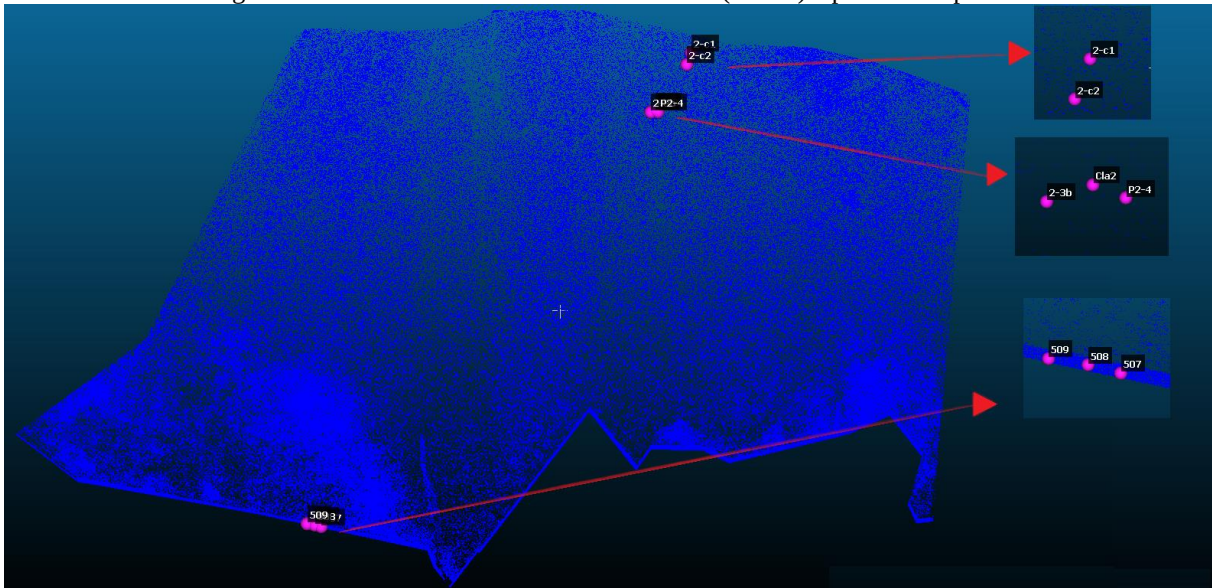
Foram rastreados 8 pontos de apoio em campo na Reserva Ponte Branca com sucesso, conforme Figura 35, (507, 508, 509, Cla2, 2-3b, P2-4, 2-c1, e 2-c2), cujas coordenadas processadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Coordenadas dos pontos de apoio.

Ponto	X (m)	Y (m)	H (m)
507	344736,922	7518351,076	377,733
508	344774,251	7518339,932	379,885
509	344818,230	7518323,644	382,066
Cla2	344110,656	7521640,508	407,674
2-3b	344128,314	7521620,248	408,462
P2-4	344092,153	7521642,377	407,299
2-c1	344076,590	7522069,048	411,206
2-c2	344068,174	7521989,934	409,904

Fonte: Autora, 2020.

Figura 35 – Pontos de terreno nos dados SVLA (900 m) e pontos de apoio.



Fonte: Berveglieri et al. (2020) e Martins Neto (2018).

Para verificar a qualidade altimétrica das nuvens de pontos aéreas são calculadas as diferenças entre as altitudes dos pontos de apoio coletados em campo e as altitudes nas nuvens de pontos para as coordenadas horizontais (X e Y) destes pontos. O cálculo foi realizado para cada um dos 3 pontos localizados dentro da área da Reserva Ponte Branca, através da ferramenta *lascontrol* do *software LAStools*, para os dois voos realizados. Esta ferramenta calcula a diferença entre a altitude obtida nos dados *LASER* e a altitude dos pontos de controle, obtidos através da tecnologia GNSS. A Tabela 4 apresenta os valores das altitudes calculadas para os pontos correspondentes na nuvem aérea 900 m e também os valores das diferenças de altitudes calculadas (ΔH). Em sequência, a Tabela 5 apresenta os valores das altitudes calculados para os pontos correspondentes na nuvem aérea 2000 m e os valores das diferenças de altitudes calculadas (ΔH).

Tabela 4 – Elevações obtidas e diferença calculada (Voo 900 m).

Ponto	Apoio H (m)	Voo 900 m H (m)	Voo 900 m ΔH (m)
507	377,733	377,594	-0,133
508	379,885	379,690	-0,198
509	382,066	381,912	-0,154
Média (m)			-0,161
Desvio Padrão (m)			0,033
RMSE (m)			0,095

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 5 – Elevações obtidas e diferença calculada (Voo 2000 m).

Ponto	Apoio H (m)	Voo 2000 m H (m)	Voo 2000 m ΔH (m)
507	377,733	377,666	-0,102
508	379,885	379,673	-0,184
509	382,066	381,930	-0,142
Média (m)			-0,142
Desvio Padrão (m)			0,041
RMSE (m)			0,085

Fonte: Autora, 2020.

Devido a nuvem de pontos (2000 m) apresentar uma densidade de pontos mais baixa do que a nuvem de pontos (900 m), não foi possível encontrar todos os pontos correspondentes aos pontos de apoio, de forma que dos 8 pontos, apenas 3 pontos correspondentes foram localizados na nuvem de pontos (2000 m). Assim, para avaliar a qualidade de ambas as nuvens, foi mantido apenas os 3 pontos para essa análise. Analisando os valores obtidos para o Voo 900 m, obteve-se -0,20 m como maior valor e -0,13 m como menor valor e um RMSE no valor de 9 cm.

Pode-se notar na Tabela 4 que o maior valor obtido para o Voo 2000 m foi de aproximadamente -0,18 m e o menor valor foi de aproximadamente -0,10 m. O RMSE calculado para este conjunto de dados foi de 8 cm.

Referências bibliográficas citadas anteriormente (Capítulo 2) abordam estudos em florestas boreais onde obteve-se valores de RMSE abaixo de 20 cm. Considerando que a área de estudo do presente trabalho trata-se de floresta tropical, com uma vegetação mais densa do que as florestas boreais, poderia se esperar um RMSE maior, mas foram obtidos RMSE de 9 e 8 cm, indicando que qualidade das nuvens aéreas (sem integração com dados terrestres) para os dois voos apresentaram uma exatidão satisfatória.

O número de pontos de apoio é baixo devido à dificuldade de se obter pontos de apoio com a acurácia necessária dentro da área de estudo (floresta densa). Foram realizadas várias

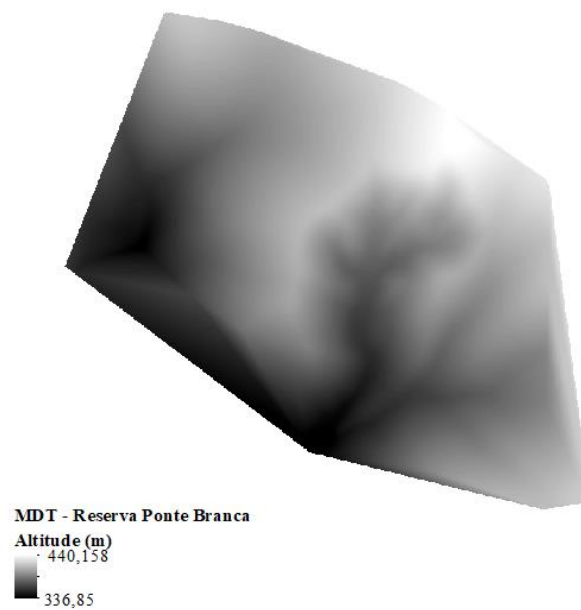
tentativas de rastreamento de pontos de apoio dentro da área de estudo (PLOT 6), porém, para algumas posições não foi possível obter as coordenadas devido às obstruções causadas pelas árvores e folhagens, e quando foi possível obter as coordenadas, a precisão não foi satisfatória. Assim, foram rastreados pontos de apoio localizados próximos às bordas da Reserva Ponte Branca, de forma que houvesse pontos de apoio. Porém, considerando que a área de estudo (PLOT 6) está localizada muito ao centro da Reserva Ponte Branca, os pontos de apoio utilizados podem não ser significativos para a área de estudo selecionada.

5.2.3 Geração do MDT

O MDT no formato raster foi gerado com módulos do pacote estatístico R com a utilização do pacote lidR (ROUSSEL et al., 2018) por Martins Neto (2018). Para a geração do MDT, foi carregada a nuvem de pontos contendo só os pontos de terreno, conforme citado no Capítulo 5, Seção 5.2.1.3. Para gerar o arquivo raster do MDT foi aplicada a triangulação TIN, por meio da função *grid_terrain*, utilizando o modelo matemático de Krigagem, onde a interpolação é feita por krigagem universal usando a função *krige*. Este método combina a abordagem do vizinho mais próximo com a abordagem de krigagem. Para cada ponto de interesse, o terreno é modelado usando os pontos de solo vizinhos mais próximos. Este método é mais difícil de manipular, mas também é o método mais avançado para interpolação de dados espaciais. O MDT foi gerado com uma resolução de 0.5 m para obter um raster em que cada pixel retornaria o valor de Z do terreno para a nuvem aérea do voo a 900 m. Esse modelo raster foi salvo no formato geotiff. Este processo foi efetuado para os pontos de terreno resultantes para os dois voos realizados (900 m e 2000 m). Para a nuvem aérea do voo a 2000 m, foi utilizada uma resolução de 2 m para a obtenção do raster. Ressalta-se que os MDTs foram gerados somente para os dados SVLA. Não foram gerados MDTs para os modelos integrados dos dados SVLA e SVLT.

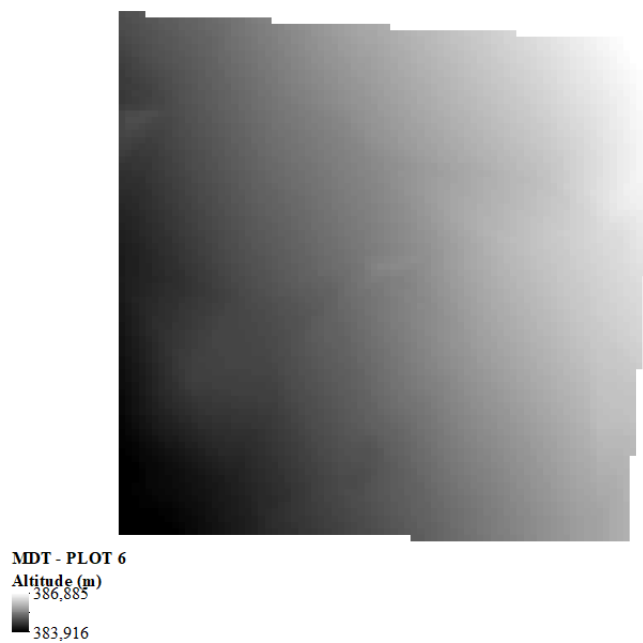
A Figura 36 apresenta o MDT gerado para o voo a uma altura de 900 m. Como pode-se notar pela legenda, menor altitude registrada é de 336,850 metros, enquanto a maior altitude é de 440,158 metros. O modelo foi gerado considerando a região da Reserva de Ponte Branca, então para restringir o MDT somente para a área de estudo (PLOT 6), realizou-se o recorte através de uma máscara (polígono do Plot 6) pela ferramenta *Extract by Mask* do *Software ArcMap*. O MDT para a área de estudo é representado pela Figura 37. Para a área de estudo a altitude dos pontos de terreno variam de 383,16 m a 386,885 m.

Figura 36 – MDT da reserva Ponte Branca (900m).



Fonte: Autora, 2020.

Figura 37 – MDT da área de estudo – PLOT 6 (900m).



Fonte: Autora, 2020.

Para realizar o controle de qualidade do MDT foi necessário realizar a busca das coordenadas planimétricas correspondentes às coordenadas planimétricas dos pontos de apoio. As coordenadas dos pontos de apoio foram carregadas no *Software* QGIS, assim como

o MDT da Reserva Ponte Branca. A seleção dos pontos foi feita manualmente e as duas camadas foram mantidas como ativas, de forma a possibilitar a apresentação da informação referente ao mesmo ponto para as duas camadas. Para essa análise, foi possível encontrar 8 pontos correspondentes aos pontos de apoio, pois ao gerar o MDT se obtém um TIN, conforme citado anteriormente no primeiro parágrafo desta seção. A Tabela 6 apresenta as elevações obtidas para cada ponto e a diferença calculada para o MDT do voo a 900 m. A Tabela 7 apresenta as elevações obtidas para cada ponto e a diferença calculada para o MDT do voo a 2000 m.

Tabela 6 – Controle de qualidade do MDT – 8 Pontos (Voo 900 m).

Ponto	Apoio Z (m)	Voo 900 m Z (m)	Voo 900 m ΔZ (m)
507	377,733	377,593	-0,140
508	379,885	379,697	-0,188
509	382,066	381,913	-0,153
Cla2	407,674	407,676	0,002
2-3b	408,462	408,055	-0,407
P2-4	407,299	407,166	-0,133
2-c1	411,206	411,229	0,023
2-c2	409,904	409,958	0,054
Média (m)			-0,118
Desvio Padrão (m)			0,148
RMSE (m)			0,182

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 7 – Controle de qualidade do MDT – 8 Pontos (Voo 2000 m).

Ponto	Apoio Z (m)	Voo 2000 m Z (m)	Voo 2000 m ΔZ (m)
507	377,733	377,594	-0,144
508	379,885	379,690	-0,156
509	382,066	381,912	-0,117
Cla2	407,674	407,695	0,021
2-3b	408,462	408,067	-0,395
P2-4	407,299	407,151	-0,148
2-c1	411,206	411,209	0,003
2-c2	409,904	410,070	0,166
Média (m)			-0,105
Desvio Padrão (m)			0,169
RMSE (m)			0,189

Fonte: Autora, 2020.

Ao analisar os valores de ΔZ da Tabela 6, nota-se o menor valor de 2 mm e o maior valor de 41 cm, ou seja, apresentam uma qualidade aceitável, considerando que a área de estudo contém uma floresta nativa com vegetação muito densa.

Ao analisar os valores de ΔZ da Tabela 7, pode-se notar que o menor valor obtido foi de aproximadamente 3 mm e o maior valor foi de 40 cm, conferindo uma qualidade similar ao mesmo controle efetuado para o MDT (900 m). Ao comparar os valores de RMSE obtidos para a diferença das elevações entre os pontos de apoio e os pontos de terreno das nuvens aéreas (Tabelas 4 e 5) com os valores de RMSE obtidos para o controle de qualidade dos MDTs, é possível notar que os valores de RMSE obtidos nos MDTs são maiores, pois foram usados mais pontos de apoio para a análise. Porém, quanto maior a amostra de pontos, maior é a confiabilidade da precisão. Segundo as normas da *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS, 2015) os MDTs gerados apresentam 35 cm e 37 cm de acurácia a um nível de confiança de 95% respectivamente, e não se enquadram nas especificações da ASPRS que sugerem uma precisão de até 33 cm para áreas com florestas. Porém, já existem estudos para áreas de vegetação nativa, onde se encontrou uma precisão para as altitudes de 30 a 40 cm (SHAN e TOTH, 2008). Assim, os MDTs apresentam uma qualidade adequada para a área de estudo, pois segundo citado anteriormente, a área contém uma vegetação nativa.

Conforme citado anteriormente, o número de pontos de apoio rastreados assim como a distribuição desses pontos não é suficiente para o controle de qualidade altimétrico rigoroso. Recomenda-se que em estudos posteriores seja obtida uma quantidade maior de pontos distribuídos pela área de estudo. A determinação de pontos de verificação é uma tarefa complexa nesta área, devido à alta densidade da vegetação, sendo muito reduzida a visibilidade, com o consequente bloqueio de sinais dos satélites GNSS.

5.2.4 Geração do CHM

Para a produção do CHM, foi realizada a normalização da nuvem de pontos bruta. A normalização permite que se obtenha a altura dos objetos, para este caso, a altura das árvores da Reserva Ponte Branca. Para aplicar a normalização, foi utilizada a função *lasnormalize* da biblioteca lidR do *Software R*. Ao subtrair o MDT, gerado na Seção 5.2.3, da nuvem bruta, obtém-se a altura normalizada das árvores (ROUSSEL et al., 2018).

Após a normalização da nuvem, é realizada a eliminação de *outliers*, pois, é possível que alguns pontos fiquem muito acima ou abaixo da altura (Z) estabelecida como 0. Para a

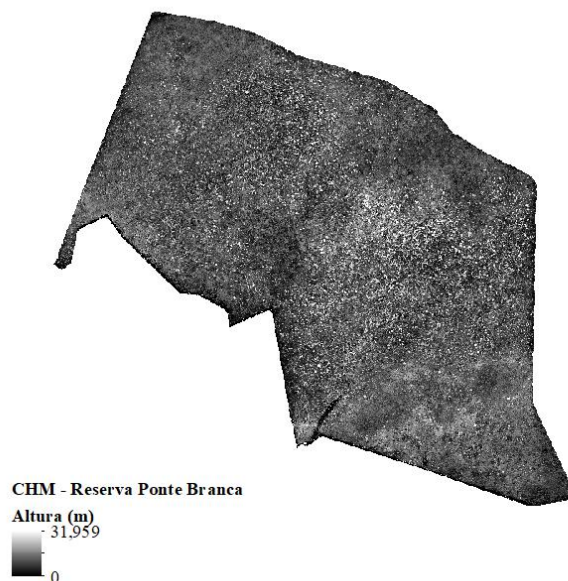
retirada dos pontos abaixo de 0 ou muito acima de 0, foi utilizada a função *lasfilter* (Software R), onde pontos acima de 40 m e abaixo de 0 m foram eliminados.

Na sequência, para gerar o *raster* do CHM, foi aplicada uma função que buscasse a altura mais alta (Z) entre todos os retornos de pulsos *LASER*. A função utilizada foi a *grid_canopy* (Software R). Esta função foi aplicada no produto normalizado, após remoção dos *outliers*. O tamanho de célula adotada para o modelo dos dados obtidos no voo a 900 m foi de 0.5 m, e 2 m para o modelo dos dados obtidos no voo a 2000 m. O algoritmo utilizado para gerar o modelo CHM foi o p2r, conforme citado no Capítulo 2, seção 2.4.

Após estes processamentos, o modelo gerado foi exportado no formato geotiff, de forma que cada pixel da imagem representa a altura do objeto. Esse processamento foi realizado para a nuvem de pontos classificada em pontos de terreno e pontos de vegetação. A Figura 39 apresenta o CHM resultante para a Reserva Ponte Branca gerado por Martins Neto (2018).

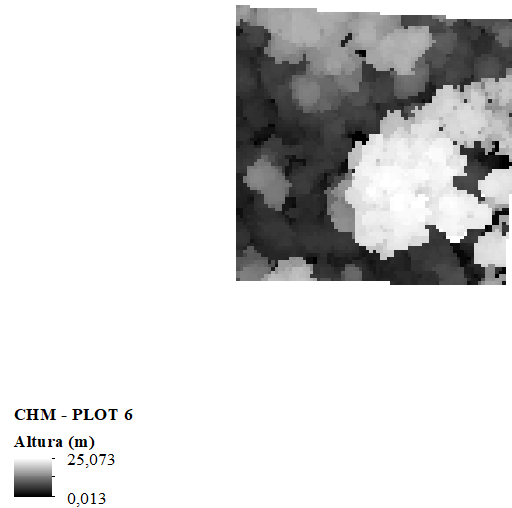
Pode-se notar na Figura 38, que a maior altura registrada na reserva equivale a 31,959 m. Para restringir o CHM somente para a área de estudo (PLOT 6), realizou-se o recorte através de uma máscara (polígono do Plot 6) pela ferramenta *Extract by Mask* do Software ArcMap. O CHM para a área de estudo é apresentado na Figura 39. Para a área de estudo a maior altura registrada foi de 25,073 metros e altura mais baixa registrada foi de 0,013 m.

Figura 38 – CHM – Reserva Ponte Branca (900m).



Fonte: Autora, 2020.

Figura 39 – CHM – Área de estudo - PLOT 6 (900m).



Fonte: Autora, 2020.

Através do CHM é possível extrair a altura das árvores. A altura das árvores é uma informação importante para compor um inventário florestal, por exemplo. Considerando a área de estudo de floresta nativa, onde o acesso em campo se torna mais difícil devido à densidade da floresta, obter os dados SVLA através dos voos permite a obtenção de dados de forma otimizada e oferece maior segurança a equipe.

5.3 Referenciamento dos Dados SVLT com os Dados SVLA

As coordenadas dos pontos obtidos pelo SVLT estão em um sistema local definido pelo próprio sistema no momento de coleta dos dados. Para realizar o referenciamento dos dados SVLT com os dados SVLA, é necessário que as coordenadas de ambos os sistemas sejam compatíveis. As coordenadas dos dados SVLA encontram-se georreferenciadas em SIRGAS 2000 e projetadas para o sistema UTM (Universal Transversa de Mercator) no fuso 22 e orientação Sul (S). Para realizar o referenciamento foi necessário selecionar pontos correspondentes em ambas as nuvens para posterior aplicação das transformações isogonal e de corpo rígido.

Selecionou-se uma amostra de 30 pontos correspondentes em cada nuvem (aérea e terrestre) de forma manual através da ferramenta *Point List Picking* do *Software CloudCompare*. As nuvens aéreas (900 m e 2000 m) estão no mesmo sistema de referência, assim, utilizou-se apenas a nuvem aérea (900 m) para realizar a seleção dos pontos. Após a

seleção da amostra de pontos correspondentes nas nuvens aérea e terrestre, considerou-se um ponto visualmente mais compatível para se utilizar como referência e analisar a qualidade dos outros pontos selecionados. O maior desafio em selecionar os pontos correspondentes está relacionado ao fato de a nuvem aérea não ter pontos que representem os troncos, então, só é possível selecionar pontos que correspondam ao topo das copas das árvores, ou a base da copa das árvores, pois os pontos correspondentes ao terreno não permitem uma diferenciação visual para seleção.

No caso da nuvem terrestre, os pontos correspondentes foram selecionados em troncos nas bases das copas das árvores dominantes, conforme descrito na seção 4.3. Obteve-se uma amostra de 6 pontos que apresentaram resíduos da diferença de distância menores do que 50 cm e esses pontos foram utilizados para calcular os parâmetros das transformações isogonal e de corpo rígido. A Tabela 8 apresenta as coordenadas planimétricas no sistema de coordenadas SVLA e no sistema SVLT referentes ao conjunto dos melhores 6 pontos correspondentes selecionados.

Tabela 8 – Coordenadas planimétricas dos pontos de referência para cálculo das transformações.

ID	SVLA		SVLT	
	E (m)	N (m)	x (m)	y (m)
0	344893,2188	7519562,0000	1,340	1,312
6	344894,6875	7519592,0000	-11,075	28,708
10	344896,1875	7519595,0000	-11,353	31,754
14	344891,1250	7519560,5000	0,576	-0,631
18	344890,8750	7519583,0000	-9,645	18,257
24	344877,3430	7519604,0000	-30,858	30,858

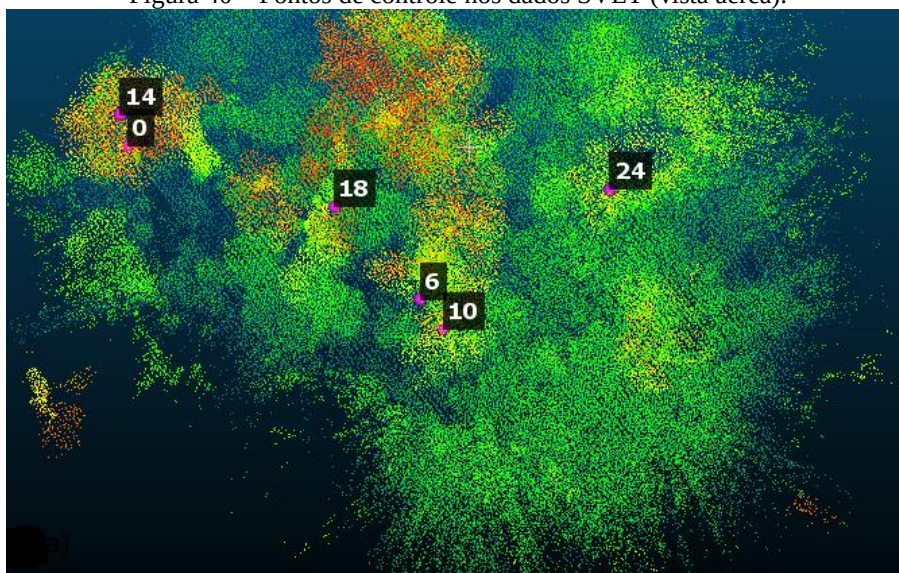
Fonte: Autora, 2020.

5.3.1 Resultados da aplicação da transformação Isogonal 2D

Após obter a obtenção das coordenadas locais para a amostra de pontos da nuvem terrestre e as coordenadas para os pontos correspondentes na nuvem aérea, conjuntos de pontos das amostras foram utilizados em uma transformação isogonal. Foram realizados vários testes para calcular os parâmetros, de forma que os pontos de controle apresentassem os melhores resíduos (menores do que 50 cm). Ao encontrar o melhor conjunto de pontos (6 pontos), realizou-se o cálculo dos parâmetros da transformação isogonal através da execução do código implementado em linguagem do *Scilab*. Os pontos utilizados foram os pontos 0, 6, 10, 14, 18, e 24, apresentados na Figura 40 nos dados SVLT. Os resultados dos resíduos, obtidos após a aplicação da transformação isogonal, são apresentados na Tabela 9. A Tabela

10 apresenta os valores calculados para os parâmetros: translação no eixo x, translação no eixo y, a rotação e fator de escala. Os parâmetros calculados serão utilizados como base para a aplicação como parâmetros aproximadas na transformação de corpo rígido. Foi realizado um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados e foram calculados os resíduos, desvio padrão estimado, e sigma a posteriori. Após o cálculo dos parâmetros, a transformação inversa é aplicada aos pontos da nuvem terrestre.

Figura 40 – Pontos de controle nos dados SVLT (vista aérea).



Fonte: Autora, 2020.

Tabela 9 – Resíduos dos pontos de controle da transformação isogonal.

Transformação Isogonal			
ID		Resíduos (m)	
Ponto 0	x1		0,209
	y1		0,241
	x2		0,280
Ponto 6	y2		-0,429
	x3		0,499
Ponto 10	y3		-0,187
	x4		-0,163
Ponto 14	y4		-0,069
	x5		-0,375
Ponto 18	y5		0,473
	x6		-0,450
Ponto 24	y6		-0,030
Desvio padrão x (m)			0,384
Desvio padrão y (m)			0,318
RMSE x (m)			0,351
RMSE y (m)			0,290

Fonte: Autora, 2020.

A análise dos resíduos apresentados na Tabela 9, mostra uma variação nos eixos x e y de 3 cm a aproximadamente 50 cm. Pode-se notar que os desvios-padrão para os eixos x e y são de 38 cm para o eixo x e 32 cm para o eixo y, enquanto o RMSE foi de 35 cm para o eixo x e 29 cm para o eixo y. O resíduo de até 50 cm é esperado devido à dificuldade de encontrar pontos correspondentes em floresta nativa. Ressalta-se também que alguns dos pontos foram localizados no topo das copas, devido à redução considerável de pontos capturados abaixo do dossel nos dados SVLA. Assim, encontrar pontos correspondentes com uma precisão melhor do que 50 cm para áreas de floresta nativa densa, exigiria outro conjunto de técnicas, o que é recomendado como um estudo futuro.

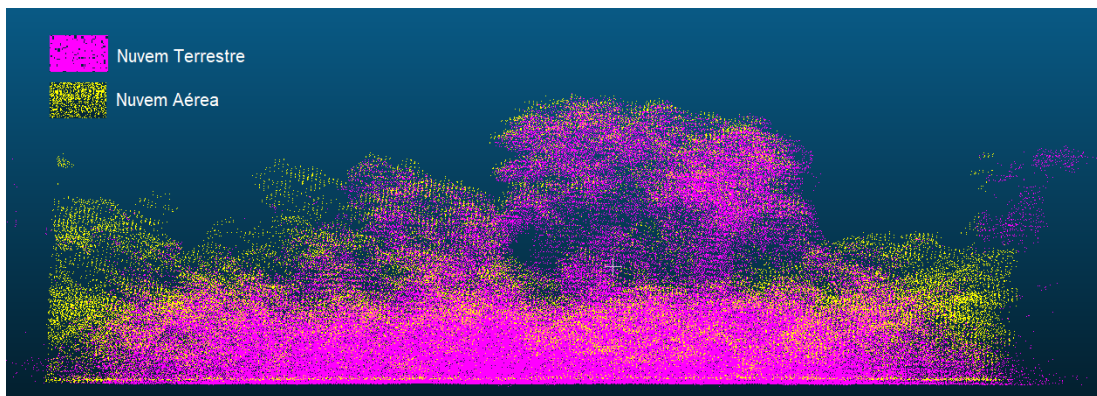
Tabela 10 – Parâmetros calculados da transformação isogonal.

Parâmetros Calculados	
Rotação (rad)	0,4816372
Escala	0,9801174
Translação em x (Tx) (m)	-344890,71
Translação em y (Ty) (m)	-7519561,2

Fonte: Autora, 2020.

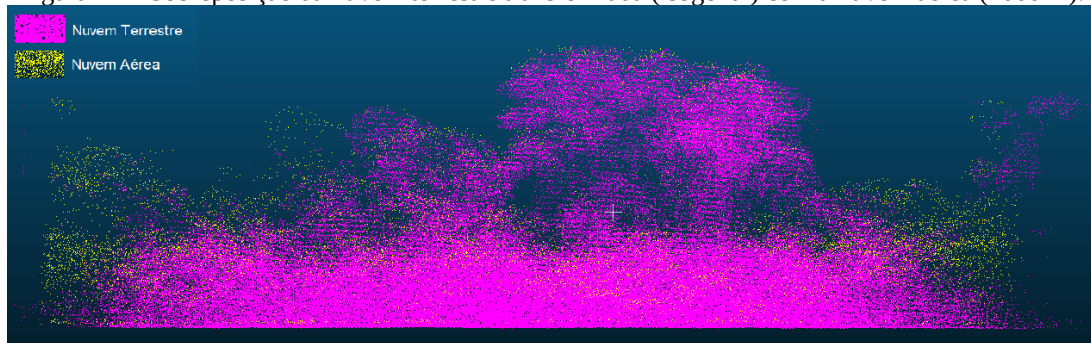
Após a transformação isogonal, é necessário realizar uma transformação que envolva a altimetria dos pontos. A maneira utilizada para calcular as diferenças de altitude entre os pontos do MDT dos dados SVLA e do MDT dos dados SVLT após a transformação planimétrica, foi a distância ao vizinho mais próximo, através da ferramenta *Cloud-Cloud Distances* do *CloudCompare*. Como os modelos estavam no mesmo sistema de referência planimétrico, o cálculo de distância foi feito para a altimetria. Para cada ponto do MDT (SVLT), foi realizada uma pesquisa do ponto mais próximo no MDT de referência (SVLA) e calculou-se a menor distância entre eles. Através desta ferramenta, foi possível encontrar a média das diferenças de altitude entre os pontos de 386,948 m, com um desvio padrão de 1,25 m, utilizando 14829 pontos. Esta altitude foi somada às altitudes dos pontos da nuvem terrestre, após a aplicação da transformação planimétrica. O resultado após a aplicação da transformação isogonal e a aplicação da translação da altitude é apresentado nas Figuras 41 e 42. Na Figura 41 a nuvem terrestre (cor rosa), após a transformação, é comparada com a nuvem aérea (cor amarela), do voo a 900 m. Já na Figura 42, a nuvem terrestre transformada (cor rosa) é sobreposta com a nuvem aérea (cor amarela) do voo a 2000 m.

Figura 41 – Sobreposição da nuvem terrestre transformada (isogonal) com a nuvem aérea (900 m).



Fonte: Autora, 2020.

Figura 42 – Sobreposição da nuvem terrestre transformada (isogonal) com a nuvem aérea (2000 m).



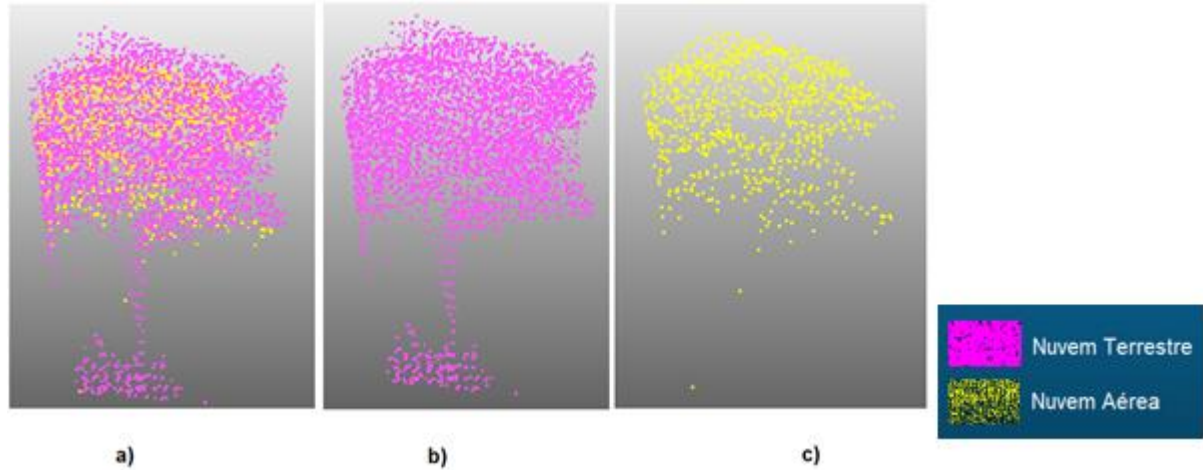
Fonte: Autora, 2020.

Na Figura 43 são apresentadas três nuvens de pontos que representam a copa e tronco de uma árvore, sendo em a) fusão da nuvem terrestre com a aérea, b) somente nuvem terrestre e c) somente nuvem aérea. Nota-se que os pontos que representam o tronco são registrados somente na nuvem terrestre transformada (isogonal), sendo necessária a integração dessa informação para compor a estrutura total da árvore. A comparação das feições nas copas é mais elucidativa, pois a alta densidade da floresta tropical da área de estudo, não permite que os dados SVLA registrem os troncos das árvores em sua totalidade. Neste exemplo, existem pontos da nuvem terrestre representando o topo da copa da árvore, porém, ao visualizar todo o dossel na Figura 41 é possível verificar que a nuvem terrestre não captura os pontos mais altos das copas das árvores. Nesse caso, haveria uma subestimação de valor ao extrair a altura da copa de uma árvore usando apenas a nuvem terrestre, por exemplo, necessitando assim que essa altura fosse extraída da nuvem aérea.

A Figura 44 apresenta a comparação de uma seção da nuvem fusionada, a seção somente para a nuvem terrestre transformada (isogonal) e para a nuvem aérea de 2000 m. A seção selecionada representa a copa de uma árvore. A nuvem aérea obtida a uma altura de

2000 m tem uma densidade de pontos menor do que a nuvem aérea obtida a uma altura de voo de 900 m. Para a integração dos dados SVLA e SVLT, a nuvem aérea obtida com altura de voo de 900 m é mais adequada, por representar as feições com maior detalhamento.

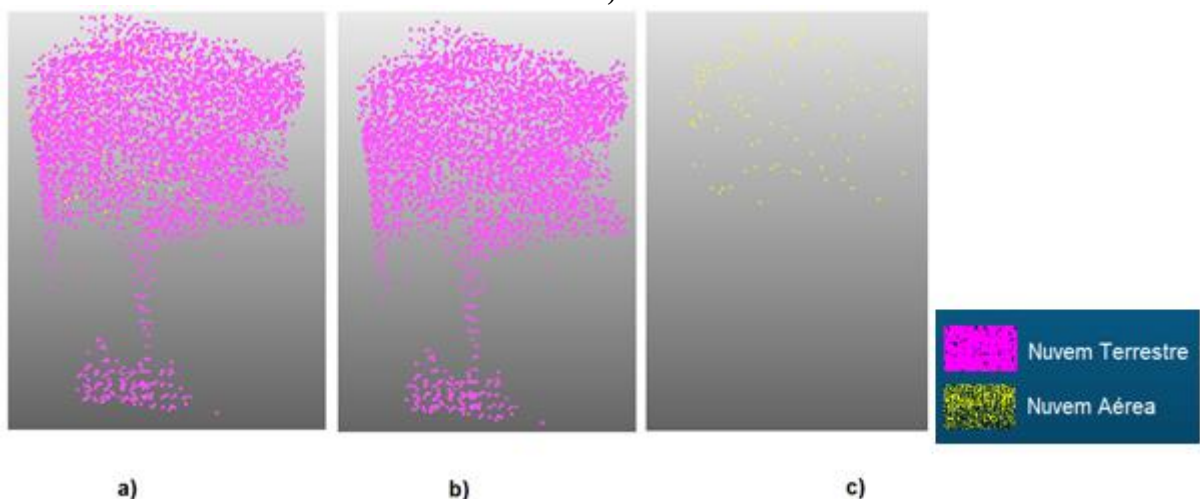
Figura 43 – Comparação de uma árvore da nuvem terrestre transformada (isogonal) com a nuvem aérea (900 m).



a) fusão da nuvem terrestre transformada (isogonal) e nuvem aérea (900 m); b) nuvem terrestre transformada (isogonal); c) nuvem aérea (900 m).

Fonte: Autora, 2020.

Figura 44 – Comparação de uma árvore da nuvem terrestre transformada (isogonal) com a nuvem aérea (2000 m).



a) fusão da nuvem terrestre transformada (isogonal) e nuvem aérea (2000 m); b) nuvem terrestre transformada (isogonal); c) nuvem aérea (2000 m).

Fonte: Autora, 2020.

Pôde-se notar, através da comparação visual, que a integração dos dados SVLA e SVLT podem fornecer maior precisão ao extrair as variáveis dendrométricas, pois os dados

SVLT registram os troncos com alta densidade, enquanto os dados SVLA registram a copa das árvores com melhor qualidade. A verificação da qualidade dos dados fusionados foi feita apenas de forma visual, recomendando-se em trabalhos futuros sejam utilizados *pontos de verificação*.

5.3.2 Resultados da aplicação da transformação de Corpo Rígido 2D

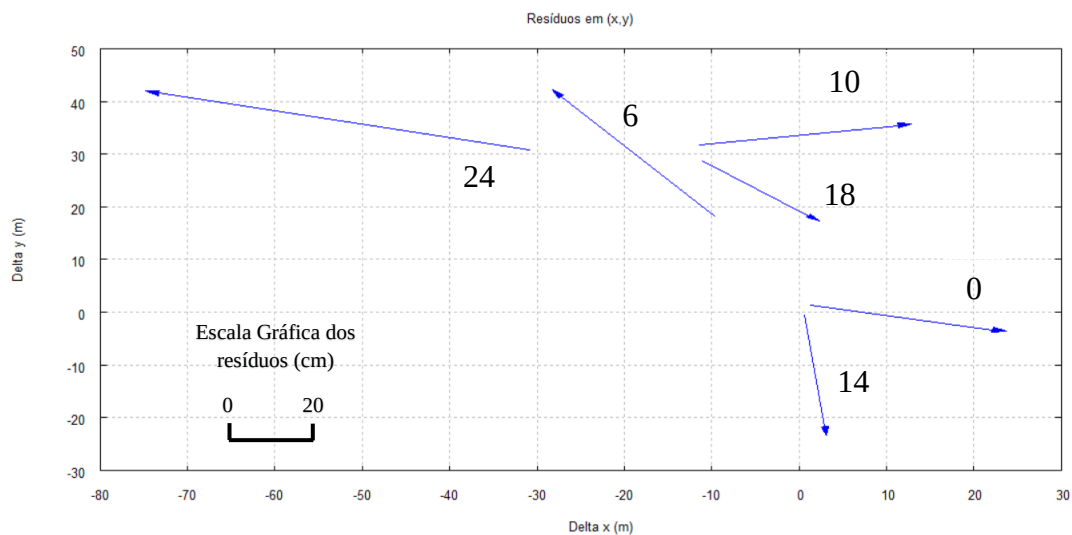
Os mesmos 6 pontos utilizados para a transformação isogonal foram utilizados para o cálculo dos parâmetros da transformação de corpo rígido. Para a transformação de corpo rígido, 3 parâmetros são calculados. Após o cálculo dos parâmetros, a transformação inversa é aplicada aos pontos da nuvem terrestre, assim como foi feito para a transformação isogonal. O cálculo dos parâmetros da transformação foi realizado através com código implementado em script do *Scilab*. Os valores aproximados de translações nos eixos x e y, e o valor inicial de rotação foram obtidos na transformação isogonal. Os resultados após o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (resíduos, desvio padrão estimado dos resíduos para o eixo x e para o eixo y, e RMSE para os eixos x e y) são apresentados nas Tabelas 11 e 12. Os resultados apresentados na Tabela 11 foram obtidos com 6 pontos e na Tabela 12 com 5 pontos, tendo sido eliminado o ponto 24. Através dos resultados dos resíduos apresentados na Tabela 11, nota-se que os resíduos para as coordenadas x e y variaram de 5 cm a aproximadamente 88 cm. A coordenada no eixo x do ponto 24 obteve o maior resíduo quando comparada as coordenadas x dos outros pontos. Todos os outros pontos apresentaram resíduos abaixo de 48 cm para ambos os eixos. Os desvios padrão estimados para os resíduos foram de 53 cm para o eixo x e de 33 cm eixo y. O cálculo de RMSE para os resíduos do eixo x, apresentou um valor de 48 cm, enquanto o RMSE para os resíduos do eixo y foi de 30 cm. Assim, como no cálculo do desvio padrão estimado, o valor de RMSE para os resíduos do eixo y é menor do que o valor de RMSE para os resíduos do eixo x. O gráfico dos resíduos para os eixos x e y é representado na Figura 45.

Tabela 11 – Resíduos dos pontos de controle da transformação de corpo rígido (6 pontos).

Transformação de Corpo Rígido		
ID	Resíduos (m)	
Ponto 0	x1	0,447
	y1	-0,100
	x2	0,268
Ponto 6	y2	-0,228
	x3	0,485
Ponto 10	y3	0,080
	x4	0,051
Ponto 14	y4	-0,456
	x5	-0,372
Ponto 18	y5	0,480
	x6	-0,879
Ponto 24	y6	0,223
Desvio padrão x (m)		0,533
Desvio padrão y (m)		0,333
RMSE x (m)		0,486
RMSE y (m)		0,304

Fonte: Autora, 2020.

Figura 45 – Gráfico dos resíduos na transformação de corpo rígido nos eixos x e y para os 6 pontos .



Fonte: Autora, 2020.

Ao analisar o gráfico dos resíduos apresentados nos eixos x e y, apresentado na Figura 45, pode-se notar que a magnitude da maioria dos resíduos dos pontos é compatível com a precisão esperada de 40 cm e não uma tendência, mostrando que os erros são randômicos e causados pela medição manual interativa dos pontos comuns.

A fim de melhorar o resultado da transformação de corpo rígido e reduzir os resíduos, o ponto 24 foi excluído e foi realizado um novo cálculo com apenas os 5 pontos restantes. Os

resíduos obtidos para os 5 pontos restantes são apresentados na Tabela 12. A Figura 46 apresenta o gráfico dos resíduos para os eixos x e y dos 5 pontos.

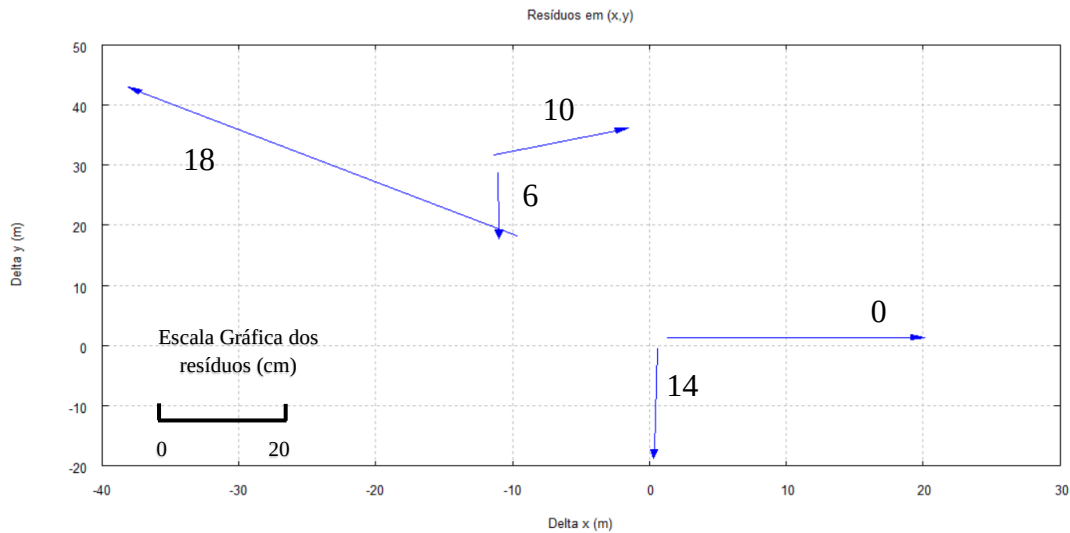
Tabela 12 – Resíduos dos pontos de controle da transformação de corpo rígido (5 Pontos).

Transformação de Corpo Rígido		
ID		Resíduos (m)
Ponto 0	x1	0,375
	y1	-0,000
Ponto 6	x2	0,002
	y2	-0,218
Ponto 10	x3	0,197
	y3	0,089
Ponto 14	x4	-0,005
	y4	-0,365
Ponto 18	x5	-0,569
	y5	0,495
Desvio padrão x (m)		0,354
Desvio padrão y (m)		0,329
RMSE x (m)		0,317
RMSE y (m)		0,294

Fonte: Autora, 2020.

Ao realizar a eliminação do ponto 24, obteve-se menores resíduos, de forma que o maior resíduo calculado foi de 57 cm no eixo x, para o ponto 18, enquanto o menor resíduo foi próximo de 0 cm no eixo y para o ponto 0. Os RMSEs obtidos apresentaram também melhores resultados, com o valor de 31 cm aproximadamente, enquanto o desvio padrão a posteriori retornou um valor de 36 cm. O desvio padrão estimado para os resíduos do eixo x foi de 35 cm, enquanto o desvio padrão estimado para os resíduos do eixo y foi de 33 cm. O RMSE para os resíduos do eixo x foi de 32 cm, enquanto o RMSE para os resíduos do eixo y foi de 29 cm. Ao retirar o ponto que tinha um resíduo maior (ponto 24), o RMSE para o eixo x se tornou-se mais próximo do valor de RMSE para o eixo y. A Figura 46 apresenta o gráfico dos resíduos para os 5 pontos apenas.

Figura 46 – Gráfico dos resíduos na transformação de corpo rígido nos eixos x e y para 5 pontos.



Fonte: Autora, 2020.

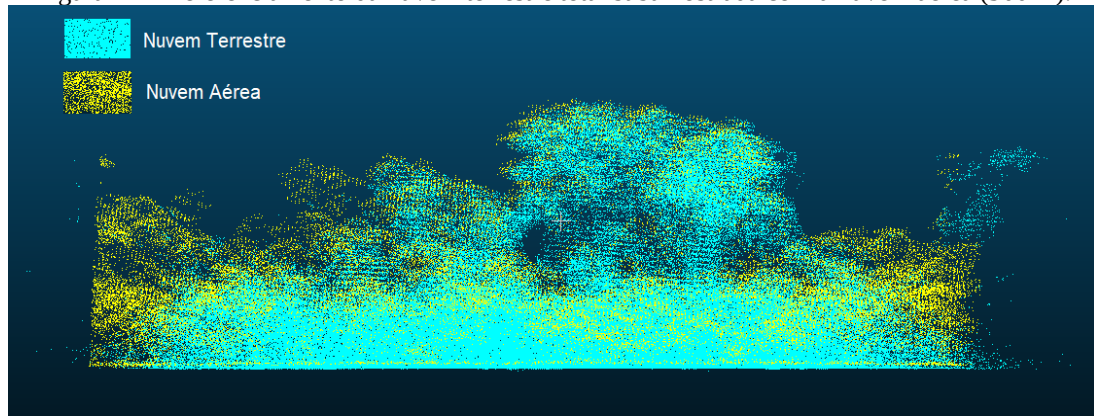
Houve uma mudança na magnitude dos resíduos dos pontos, verificando-se que apenas um dos pontos tem a magnitude do resíduo no eixo x substancialmente maior que os outros pontos. Aplicou-se a transformação de corpo rígido com 5 pontos de apoio na nuvem terrestre total subamostrada, para transformar a nuvem terrestre para o mesmo sistema de referência das nuvens aéreas. Após a aplicação da transformação de corpo rígido, foi realizada transformação altimétrica da nuvem terrestre para o mesmo sistema altimétrico da nuvem aérea.

As Figuras 47 e 48 apresentam a sobreposição da nuvem terrestre após a aplicação dos referenciamentos planimétrico e altimétrico com as nuvens aéreas obtidas à alturas de voo de 900 m e 2000 m, respectivamente. Ao analisar a Figura 47, é possível notar que os pontos da nuvem aérea (900 m) recobrem o topo das copas, enquanto os pontos da nuvem terrestre não atingem os pontos mais altos nas copas, ou seja, ao utilizar somente os dados terrestres para extrair a altura das árvores, por exemplo, o valor obtido seria subestimado. Ao comparar a Figura 47 com a Figura 48 pode-se notar que os pontos da nuvem aérea (900 m) têm maior densidade de pontos do que a nuvem aérea (2000 m). Para extrair informações manualmente, como é proposto nesse estudo, torna-se necessário utilizar o conjunto de dados que oferece maior detalhamento. Assim, o modelo fusionado que será utilizado para se extrair a variável dendrométrica DAP será o modelo fusionado (nuvem terrestre total + nuvem aérea (900 m)).

A verificação de qualidade do referenciamento foi realizada através da análise visual de seções isoladas da nuvem terrestre registrada e as nuvens aéreas para a mesma área (Figuras 49 a 53). Não foram utilizados pontos de *verificação* para realizar o controle de

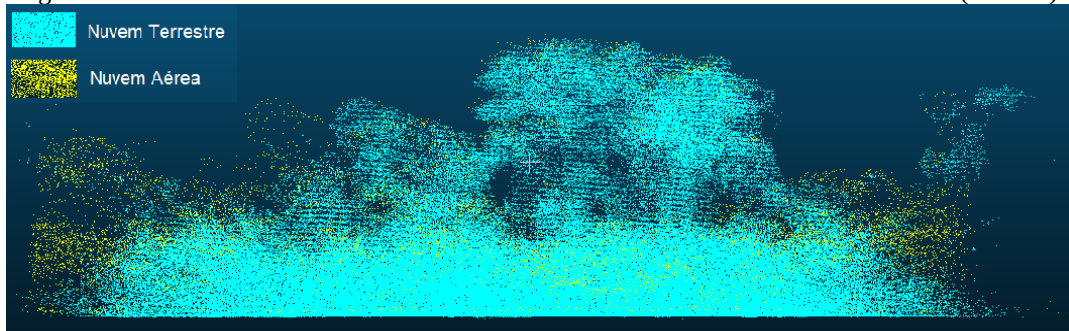
qualidade, devido à dificuldade de se encontrar pontos homólogos em uma área de vegetação densa. Selecionar vários pontos nas copas torna-se um desafio, considerando a densidade de pontos que delimitam essa feição, já os troncos só foram representados nas nuvens terrestres, pois as nuvens aéreas não obtiveram essa informação com detalhamento suficiente, devido à alta densidade das copas das árvores.

Figura 47 – Referenciamento da nuvem terrestre total subamostrada com a nuvem aérea (900 m).



Fonte: Autora, 2020.

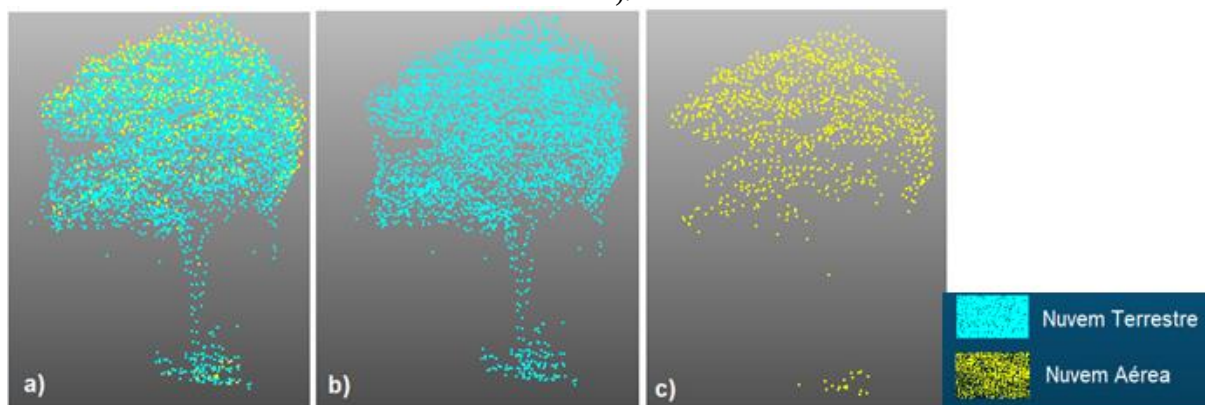
Figura 48 – Referenciamento da nuvem terrestre total subamostrada com a nuvem aérea (2000 m).



Fonte: Autora, 2020.

A Figura 49 apresenta uma árvore isolada representada de três maneiras: a – integração da nuvem terrestre e nuvem aérea, b – nuvem terrestre, e c – nuvem aérea. O padrão analisado na Figura 47 pode ser reconhecido, de forma que há pontos da nuvem aérea que representam o topo da copa da árvore, mas é necessária a nuvem terrestre para se extrair as informações dos troncos.

Figura 49 – Comparação de uma árvore da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (900 m).

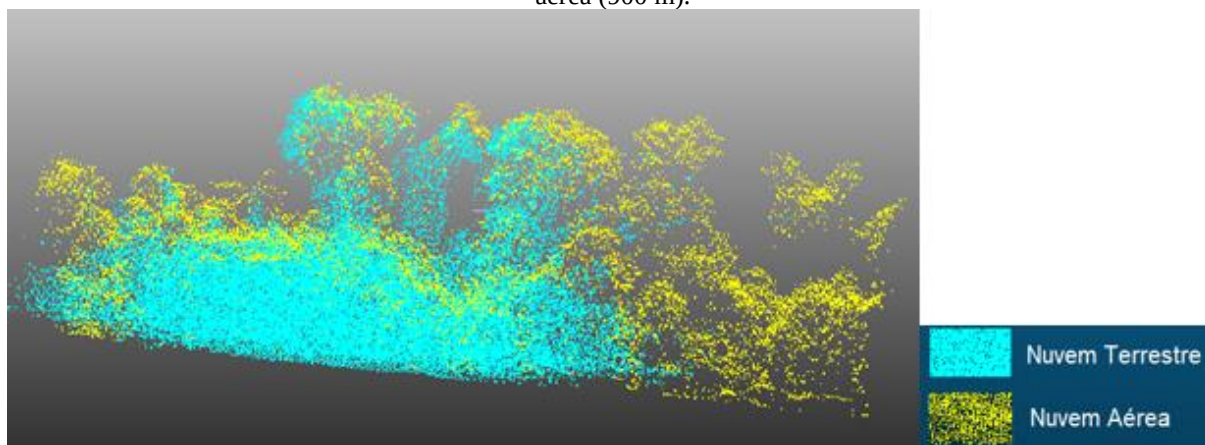


a) fusão da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) e nuvem aérea (900 m); b) nuvem terrestre transformada (corpo rígido); c) nuvem aérea (900 m).

Fonte: Autora, 2020.

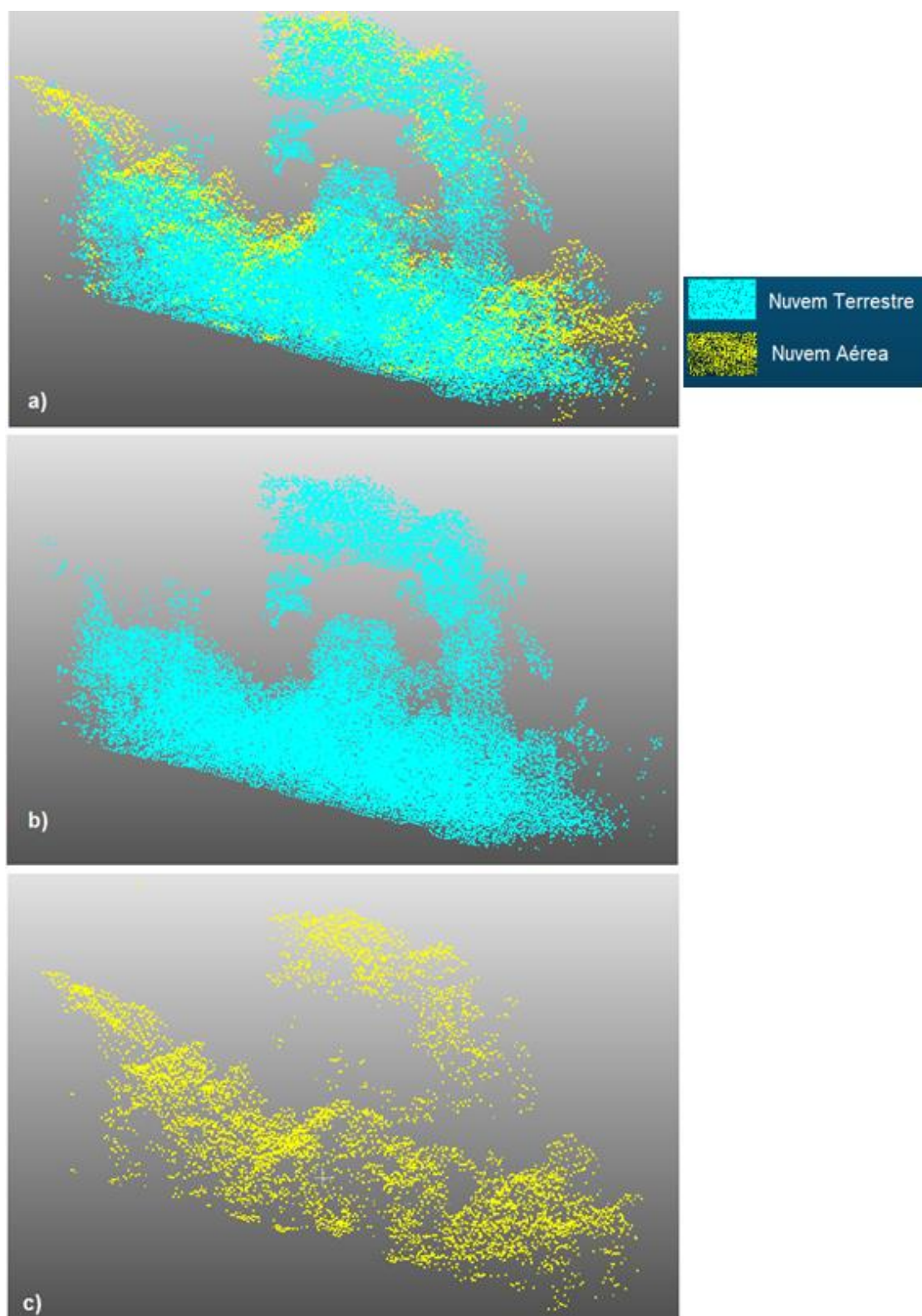
A Figura 50 apresenta uma seção horizontal das nuvens fusionadas, sendo possível notar que a nuvem aérea complementa a nuvem terrestre para definição da copa. As Figuras 51, 52, e 53, apresentam três seções distintas que evidenciam a necessidade da integração dos dados SVLT e SVLA para se obter medidas mais precisas em relação ao tronco e altura das árvores.

Figura 50 – Sobreposição de uma seção horizontal da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (900 m).



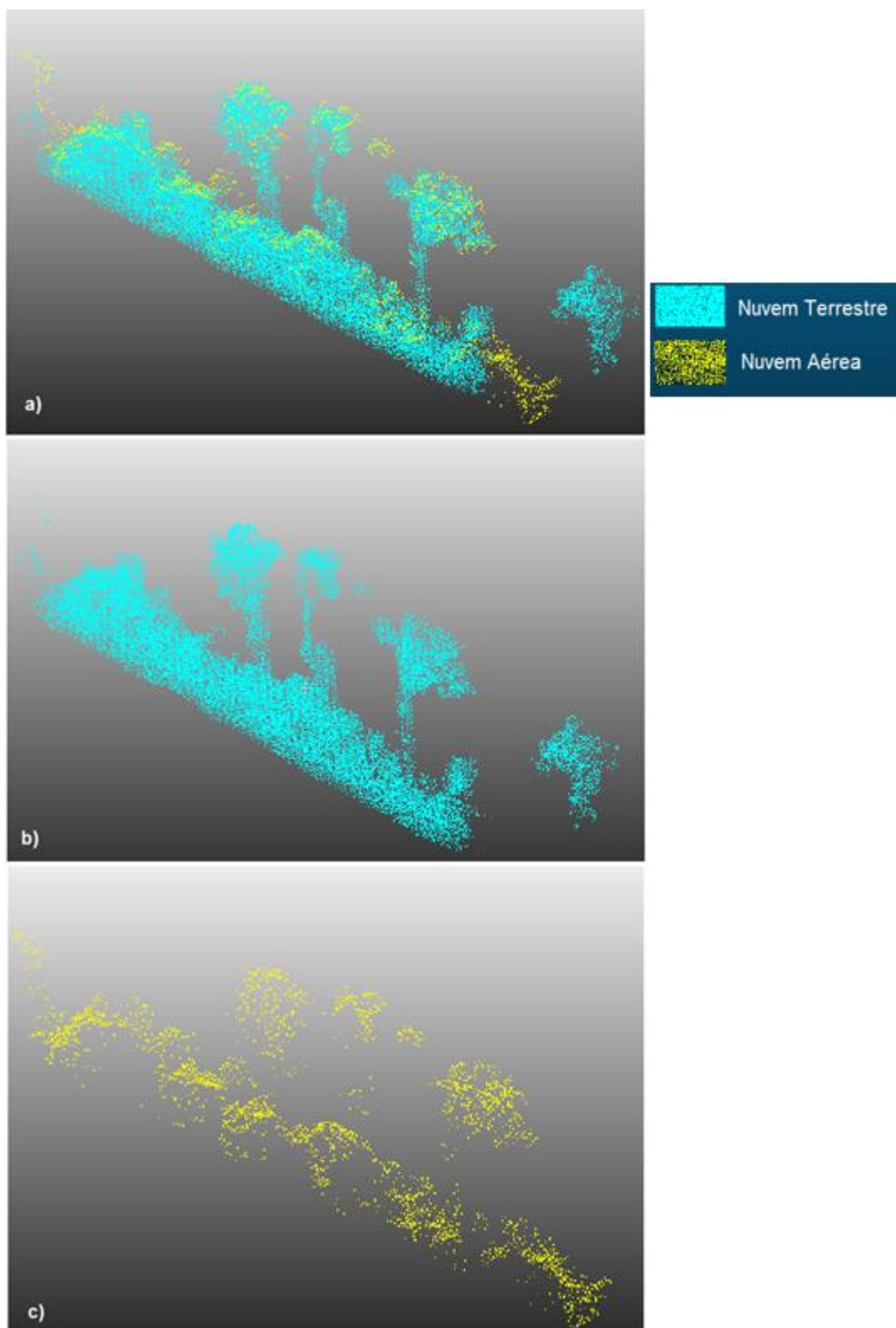
Fonte: Autora, 2020.

Figura 51 – Comparação de seção 1 da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (900 m).
a) fusão da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) e nuvem aérea (900 m); b) nuvem terrestre transformada (corpo rígido); c) nuvem aérea (900 m).



Fonte: Autora, 2020.

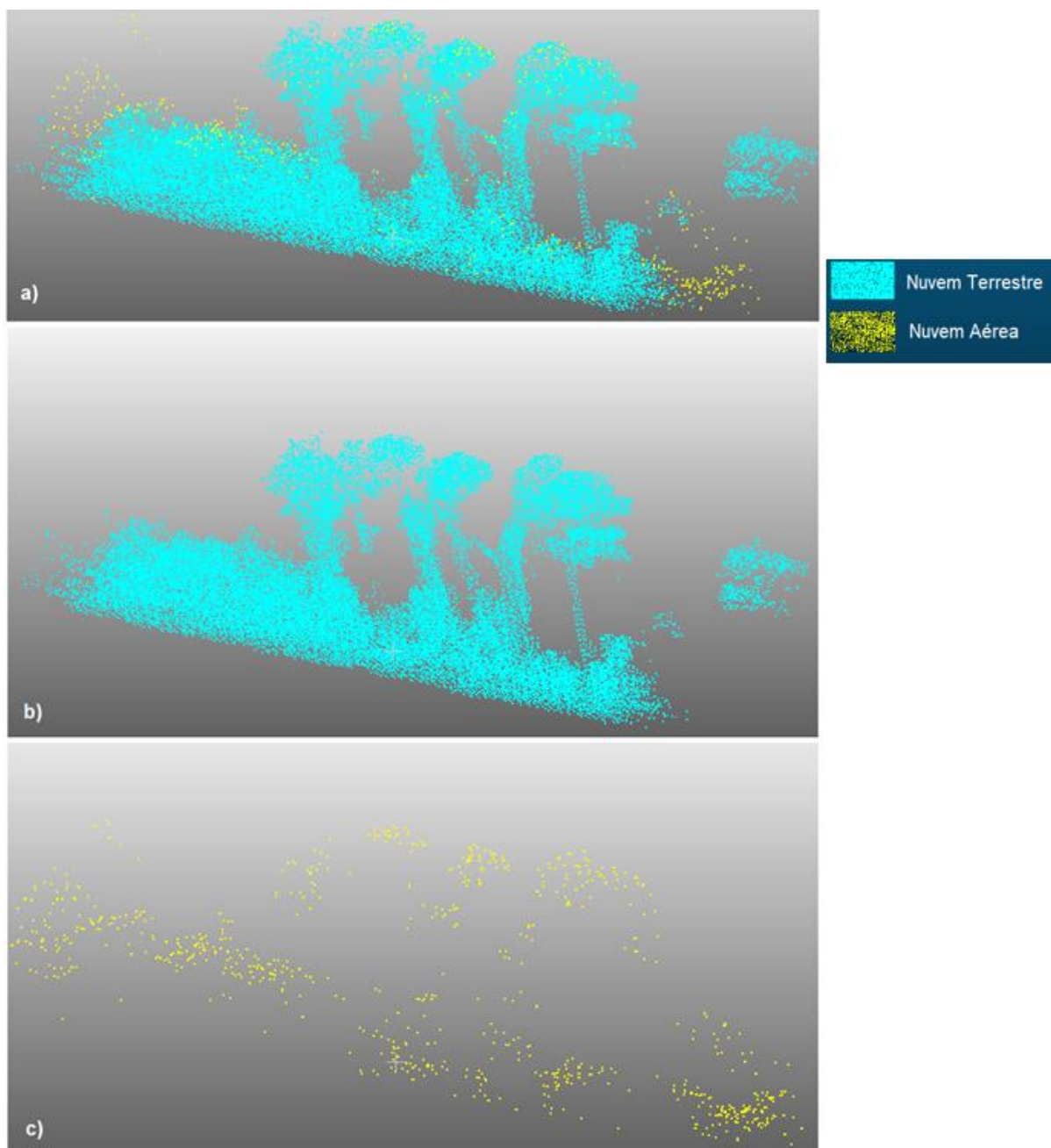
Figura 52 – Comparação de seção 2 da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (900 m).
a) fusão da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) e nuvem aérea (900 m); b) nuvem terrestre transformada (corpo rígido); c) nuvem aérea (900 m).



Fonte: Autora, 2020.

Figura 53 – Comparação de seção 3 da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) com a nuvem aérea (2000 m).

a) fusão da nuvem terrestre transformada (corpo rígido) e nuvem aérea (2000 m); b) nuvem terrestre transformada (corpo rígido); c) nuvem aérea (2000 m).



Fonte: Autora, 2020.

Conforme citado anteriormente, a nuvem aérea obtida a uma altura de 2000 m apresentou uma densidade de pontos muito inferior à nuvem aérea obtida a uma altura de 900 m, sendo utilizada somente a nuvem terrestre fusionada com a nuvem aérea (900 m) e o CHM obtido através do processamento da nuvem aérea (900 m) para a extração das variáveis dendrométricas. A próxima seção aborda como a extração das variáveis foi realizada.

5.4 Extração das Variáveis Dendrométricas

Uma equipe do PPGCC coletou dados em campo na Reserva Ponte Branca, como as espécies das árvores, posição aproximada na área e medição direta do diâmetro a altura do peito das árvores principais ou dominantes. Os dados foram disponibilizados para que esse estudo fosse realizado. A Tabela 13 apresenta as coordenadas das árvores de referência, assim como a variável dendrométrica DAP e o tipo de espécie de cada árvore. Apenas as coordenadas E e N foram extraídas dos dados SVLA (CHM – 900 m), através de seleção manual de pontos localizados no topo da copa das árvores. Foi selecionado um ponto de referência para cada árvore. As outras variáveis (diâmetro à altura do peito - DAP), e espécie da árvore (Espécie) foram extraídas em uma missão de campo por membros da Equipe de Fotogrametria do PPGCC, como mencionado. O estudo presente apresentará, posteriormente, as variáveis de área da copa (AC), altura das árvores (H) e diâmetro da copa (DC). Deste ponto em diante, utilizaremos as siglas das variáveis dendrométricas (AC, DC, H, DAP) para discussão dos valores estimados.

Tabela 13 – Coordenadas das árvores de referência e DAP medido em campo.

ID	E	N	DAP (cm)	Espécie
1	344876,81	7519582,27	91,04	Peroba
2	344886,71	7519592,45	73,21	Peroba
3	344886,39	7519614,99	70,03	Amendoim
4	344876,55	7519601,97	66,84	Jatobá
5	344861,79	7519567,21	51,88	Peroba

Fonte: Equipe de Fotogrametria – PPGCC, 2016.

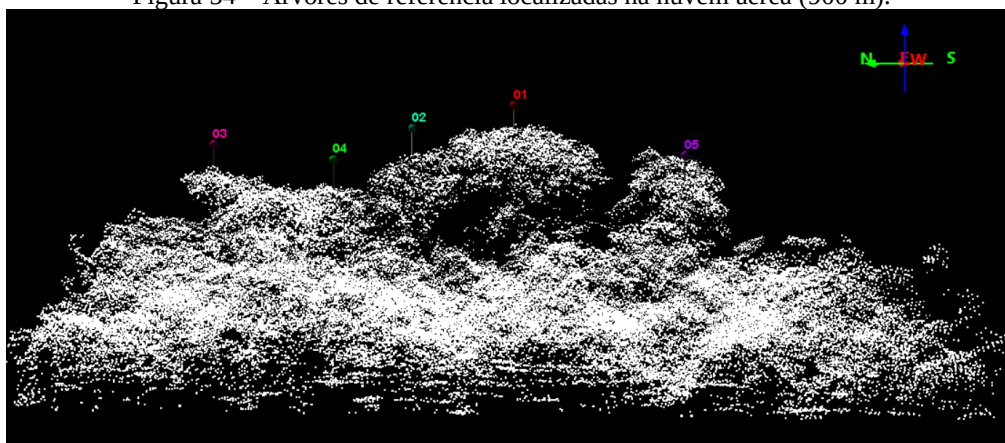
Após localizar as coordenadas E (Leste) e N (Norte) na nuvem aérea (dados SVLA) foi possível visualizar e medir as distâncias entre as árvores, para posterior localização das mesmas árvores nos dados SVLT. Os valores encontrados para as árvores de referência nos dados SVLT originais, antes de serem transformados para o mesmo referencial dos dados SVLA, são apresentados na Tabela 14, e as árvores são apresentadas nas Figura 54 e 55. A Figura 54 apresenta a posição das árvores na nuvem aérea (900 m) e a Figura 55 apresenta a posição das árvores na nuvem terrestre. Utilizou-se as coordenadas locais para que fosse apresentado como os dados SVLT estavam referenciados a um sistema diferente do sistema dos dados SVLA, enfatizando-se a necessidade da aplicação da transformação de corpo rígido para que fosse possível integrar ambos os dados.

Tabela 14 – Coordenadas locais das árvores de referência para comparação das variáveis nos dados SVLT.

ID	x (m)	y (m)	z (m)
1	-22,899	13,452	22,776
2	-20,488	25,473	19,992
3	-29,402	47,349	18,153
4	-13,041	35,336	14,790
5	-31,476	-8,082	16,038

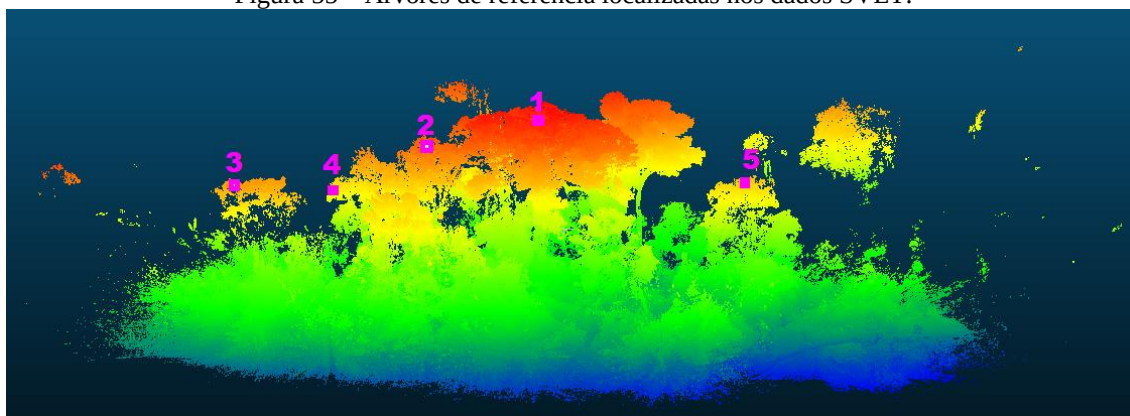
Fonte: Autora, 2020.

Figura 54 – Árvores de referência localizadas na nuvem aérea (900 m).



Fonte: Autora, 2020.

Figura 55 – Árvores de referência localizadas nos dados SVLT.



Fonte: Autora, 2020.

As variáveis dendrométricas são extremamente importantes para compor um inventário florestal. Para este estudo, optou-se pela extração das variáveis DAP, H, AC, e DC. Através da nuvem fusionada dos dados SVLT e SVLA, após o referenciamento com a transformação de corpo rígido com 5 pontos de controle foi possível extrair a variável DAP de 6 árvores selecionadas. Das 6 árvores, 5 tiveram o DAP medido em campo.

As alturas das árvores foram medidas através do CHM gerado após processamento da nuvem área (900 m). A Tabela 15 apresenta as alturas das árvores obtidas através do CHM. Observa-se que a árvore mais alta tem aproximadamente 24,78 m e a árvore mais baixa tem a altura de aproximadamente 17,14 m.

Tabela 15 – Alturas das árvores selecionadas.

ID	Altura (H) (m)
2	21,00
3	18,09
4	17,14
5	19,44
6	24,78
7	21,96

Fonte: Autora, 2020.

Dentre as 6 árvores, 5 delas tiveram os valores de DAP medidos em campo, sendo possível realizar a comparação com os valores de DAP medidos no modelo fusionado para essas árvores. Para se obter a área da copa de cada árvores, foi realizada uma segmentação manual de cada copa no CHM (900 m) no *software* QGIS. Após a segmentação, as áreas foram calculadas. Com as áreas calculadas, pôde-se estimar dos diâmetros de copa para as árvores.

A Tabela 16 apresenta os valores de DAP (M) medidos em campo, os valores de DAP (N) medidos no modelo fusionado, os valores de AC medidos através da segmentação e os valores de DC estimados através de AC. Os valores de DAP (N) foram medidos manualmente através da ferramenta de medição de distâncias do *CloudCompare*, utilizando o modelo fusionado (nuvem terrestre + nuvem área (900 m)). Foram utilizadas as coordenadas das árvores de referência (Dados SVLA) para que fosse possível localizar as árvores e medir o DAP para cada uma delas. A Tabela 17 apresenta os resíduos obtidos ao comparar os valores de DAP medidos em campo com os valores de DAP extraídos do modelo fusionado para 5 árvores.

No modelo fusionado é possível identificar 6 árvores dominantes, porém, somente 5 destas árvores tiveram seu DAP medido em campo. Para que seja possível conferir a qualidade da medida (DAP) efetuada no modelo fusionado, foram utilizadas apenas as 5 árvores que medidas em campo.

Tabela 16 – Variáveis dendrométricas extraídas e calculadas.
(M) - medidas feitas em campo e (N) - medidas feitas na nuvem de pontos.

ID	AC (m ²)	DC (m)	DAP (cm) (M)	DAP (cm) (N)
2	181,69	15,21	73,21	68,20
3	98,85	11,22	70,03	67,60
4	86,28	10,48	66,84	65,30
5	79,48	10,05	51,88	43,70
6	296,21	19,42	91,04	81,40
7	28,77	6,05	-	43,50

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 17 – Discrepâncias entre DAPs medidos em campo e DAPs medido na nuvem.

ID	DAP (cm)
2	-5,01
3	-2,43
4	-1,54
5	-8,18
6	-9,64
Média (cm)	-5,36
Desvio Padrão (cm)	3,52
RMSE (cm)	6,22

Fonte: Autora, 2020.

Nota-se na Tabela 17 que a maior discrepância obtida corresponde a 9,64 cm e a menor corresponde a 1,54 cm. A média das discrepâncias é de 5,36 cm e o RMSE calculado é 6,22 cm. O que pode ter interferido nos resultados é o fato de serem encontradas oclusões de partes dos troncos devido à quantidade de arbustos e folhas elevadas, o que reduz a quantidade de pontos que atingem os troncos. Também, como o DAP é extraído a uma altura de 1,30 m, a quantidade de arbustos é maior, pois trata-se de uma área de floresta nativa densa. De qualquer modo, este valor do RMSE é compatível com aqueles obtidos em outros estudos para a medição em árvores isoladas. Liang et al. (2016) obteve em seu estudo o RMSE de 7,6 cm, por exemplo, ao medir o DAP de árvores em dados SVLT.

Para estimar ou verificar a qualidade do DC medido, aplicou-se um modelo de regressão. Existem vários modelos de regressão que podem ser utilizados para estimar a variável DC, mas o modelo utilizado para verificar a compatibilidade dos dados foi o modelo de regressão, proposto por Leão et al. (2017). Este modelo foi utilizado para algumas espécies de árvores localizadas na Mata Atlântica. Trata-se de espécies diferentes das espécies do presente estudo, e como se trata de um modelo de regressão, é necessário realizar um ajustamento para a estimação dos coeficientes e posterior aplicação do modelo. O modelo utiliza 3 coeficientes e as variáveis DAP e H para estimar DC, como mostrado na equação 28.

Segundo Leão et al. (2017), este modelo apresentou um coeficiente de determinação de 0,5 e um erro padrão da estimativa de 34,8%.

Para calcular o modelo de regressão foram utilizados os diâmetros das copas medidas como observações e os valores correspondentes de DAP e H, sendo estimados os coeficientes (β_0 , β_1 , e β_2), obtendo-se os valores apresentados nas Tabelas 18 e 19. A Tabela 18 apresenta os coeficientes calculados e a Tabela 19 apresenta as estatísticas calculadas. O modelo de regressão foi avaliado através do coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajust), o erro padrão da estimativa (Syx) e o valor de F, com probabilidade de 95%.

Tabela 18 – Coeficientes do modelo de regressão.

Coeficientes Estimados	
β_0	-12,16306238
β_1	0,132247383
β_2	0,801513048

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 19 – Estatísticas do modelo de regressão para estimar DC.

Modelo	Syx %	Syx pós %	Syx pós %	SQ t	SQ res	R^2	R^2 ajust	F
Leão	7,410	0,721	1,086	63,941	1,039	0,984	0,967	60,515

Fonte: Autora, 2020.

Os valores estimados pela regressão, usando como dados de entrada o DAP e altura da árvore foram comparados com os valores medidos no CHM, e são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 – Comparação entre DC medido na nuvem de pontos (N) e DC estimado (E) através do modelo de regressão para árvores da mata atlântica (Leão et al., 2017).

ID	DAP (cm)	Altura (cm)	DC (E) (m)	DC (N) (m)	Δ DC (m)	Δ DC (%)
2	73,21	210,0	15,21	14,35	0,86	5,65
3	70,03	180,9	11,22	11,60	-0,38	-3,36
4	66,84	171,4	10,48	10,41	0,06	0,63
5	51,88	194,4	10,05	10,28	-0,23	-2,28
6	91,04	247,8	19,42	19,74	-0,32	-1,63
Desvio					0,510	3,58
Padrão (m)						
RMSE (m)					0,456	3,21

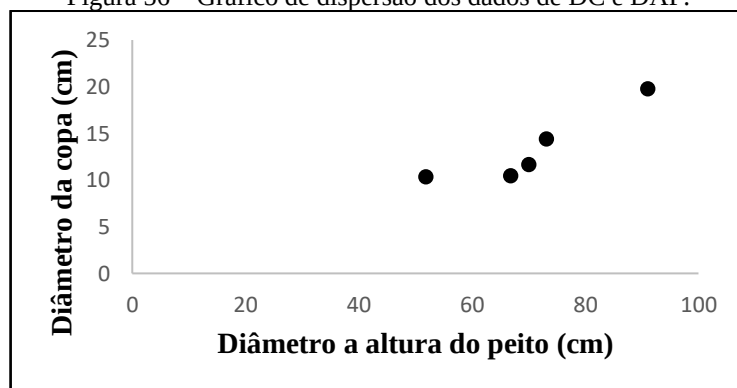
Fonte: Autora, 2020.

Nota-se na Tabela 20 que o maior resíduo obtido foi de aproximadamente 5,65 % e o menor resíduo obtido foi de 0,63 %. Neste estudo, por exemplo, os resíduos maiores podem ser explicados pelo fato das áreas das copa das árvores terem sido obtidas através da

segmentação manual utilizando o CHM. Por se tratar de uma área com copas próximas, pode ocorrer confusão ao delinear as copas das árvores. O desvio padrão obtido para os resíduos foi de 0,51 m e o RMSE calculado foi 0,46 m. O valor de RMSE de aproximadamente 46 cm é esperado, devido à área de estudo ser composta por floresta nativa e a extração manual de medidas no modelo fusionado ser complexa devido à oclusão de feições por folhagens e galhos.

Através do gráfico de dispersão dos dados de DC e DAP, apresentado na Figura 56, foi realizada a análise de correlação entre estes dados. A relação entre o DC e o DAP apresentam uma tendência linear. Ao analisar o gráfico da Figura 56 pode-se perceber a correlação positiva entre os valores de DC e DAP, pois quanto maior o valor de DAP, maior foi o valor estimado para DC. Embora exista uma correlação entre DC e DAP, pois o aumento no DAP implica em aumento do DC, a equação 28 mostra que há ainda uma dependência da altura da árvore. As variáveis dendrométricas extraídas nesse estudo obtiveram a precisão e o comportamento esperado, como citado por algumas referências (LEÃO et al., 2017; LIANG et al., 2016).

Figura 56 – Gráfico de dispersão dos dados de DC e DAP.



Fonte: Autora, 2020.

6 CONCLUSÃO

Este estudo utilizou dados provenientes de um Sistema de Varredura a *LASER* Aerotransportado (SVLA) e de um Sistema de Varredura a *LASER* Terrestre (SVLT), de forma a combiná-los e teve como objetivo extrair informações (variáveis dendrométricas) para uma área de floresta tropical, tipicamente caracterizada pela alta densidade de biomassa.

O referenciamento das nuvens terrestres (SVLT) para um mesmo sistema local apresentou uma acurácia de 5 cm para o posicionamento dos pontos. A subamostragem das nuvens terrestres reduziu a 17 % a quantidade de pontos das nuvens originais, mas mantendo as feições mais importantes. Esta subamostragem das nuvens possibilitou a otimização do tempo de processamento dos dados e economia no espaço de armazenamento. Esta redução pode também prejudicar a estimativa das variáveis dendrométricas, sendo recomendável no futuro estudar o efeito desta subamostragem na qualidade destas variáveis.

Os MDTs gerados através do processamento das nuvens aéreas (altura de voo: 900 m e 2000 m) apresentaram uma precisão de aproximadamente 19 e 18 cm. Esta acurácia obtida para os MDTs foi compatível com a precisão obtida para as nuvens aéreas originais quando a precisão altimétrica foi verificada. Porém, como citado nos experimentos, poucos pontos de apoio foram obtidos para realizar esse controle. Recomenda-se que para se obter um controle de qualidade mais acurado, sejam utilizados mais pontos de apoio para realizar o controle de qualidade.

Os CHMs produzidos foram importantes para a extração da variável dendrométrica de altura das árvores e área das copas das árvores. Para estudos futuros seria interessante realizar uma comparação das alturas das árvores obtidas no CHM dos dados SVLA com aquelas obtidas no modelo fusionado. Dessa forma, seria possível analisar se o modelo fusionado forneceria acurácia inferior ou superior na extração dessa informação, devido à agregação da informação do SVLT.

Ao comparar visualmente o referenciamento planimétrico e altimétrico dos dados SVLA e SVLT pós processados, obteve-se um resultado satisfatório, com a nuvem terrestre final posicionada no mesmo sistema de referência das nuvens aéreas e combinadas com a acurácia adequada. A fusão da nuvem terrestre final com as nuvens aéreas para os dois voos realizados geraram dois modelos 3D de nuvens de pontos representando as feições para a área de estudo. O modelo fusionado utilizado para a extração das variáveis dendrométricas foi aquele que utilizou a nuvem aérea obtida no voo a uma altura de 900 m por fornecer uma maior densidade de pontos em comparação com a nuvem de pontos obtida a uma altura de

2000 m. Ou seja, recomenda-se que, para extrair informações como variáveis dendrométricas, se utilize dados com maior densidade de pontos.

A variável dendrométrica DAP foi extraída através do modelo fusionado, enquanto as variáveis H e AC foram extraídas do CHM. A variável dendrométrica DC foi estimada através de modelo de regressão utilizando as variáveis H e DAP. Obteve-se uma precisão de 6 cm para a variável DAP. Para a variável DC não é possível estimar a sua precisão, pois não foram realizadas medidas diretas de referência, realizando-se neste estudo apenas uma análise de regressão que apresentou um erro percentual médio de 3,21 para a variável DC.

A combinação dos dados SVLA e SVLT foi essencial para que fosse possível a extração de todas as variáveis dendrométricas. Estes dados se complementam e fornecem informações de terreno e da vegetação de forma a representar toda a estrutura da floresta. Os dados SVLA possibilitam que se obtenha maior acurácia ao estimar a altura das árvores, enquanto os dados SVLT permitem que seja possível extrair medidas dos troncos das árvores, por exemplo. Este estudo conclui que extração de variáveis dendrométricas em uma floresta tropical através da combinação de dados SVLA e SVLT retornaram uma qualidade satisfatória quando comparadas a outros estudos, mesmo com o desafio de se obter estes dados de forma manual em uma área que apresenta oclusão para algumas feições, devido à alta densidade da floresta. Recomenda-se que sejam utilizadas as nuvens terrestres originais para os processamentos e para compor o modelo 3D fusionado, caso seja possível, pois o uso de uma nuvem subamostrada causou uma maior dificuldade para extrair a variável DAP das árvores principais.

Para futuros estudos, recomenda-se que sejam extraídas as variáveis AC e DC do modelo 3D para realizar uma comparação com os valores medidos para essas mesmas variáveis no CHM obtido através dos dados SVLA. Também, recomenda-se a seleção de uma amostra maior de árvores para realizar as medidas e experimentos, visto que apenas 5 árvores formam uma amostra reduzida para validar uma metodologia. Estudos feitos em áreas de florestas boreais apresentaram resultados melhores para variáveis dendrométricas extraídas do modelo 3D fusionado (DC e H) quando comparados somente com as variáveis dendrométricas extraídas dos dados SVLA e SVLT isoladamente (PARIS et al., 2015).

As técnicas utilizadas pelo estudo podem ser úteis para o monitoramento da biodiversidade dos recursos naturais, podendo ser aplicada futuramente em outras áreas de estudo similares. A recomendação para otimização do processo é desenvolvimento de algoritmos de extração das variáveis que considerem florestas complexas como a floresta

tropical, o desenvolvimento de algoritmos automáticos para o referenciamento das nuvens e extração destas variáveis.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F. On the status and accuracy performance of GPS photogrammetry. **Proceedings of Mapping and Remote Sensing Tools for the 21st Century**, 26-29 Agosto, Washington - DC, p. 80–90, 1994.
- ASHRAF, IMRAN; HUR, SOOJUNG; PARK, YONGWAN. An Investigation of Interpolation Techniques to Generate 2D Intensity Image from LIDAR Data. **IEEE Access**, v. 5, p. 8250-8260, 2017, doi 10.1109/ACCESS.2017.2699686.
- ASPRS. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 81, n. 3, p. A1–A26, 2015, doi 10.14358/PERS.81.3.A1-A26.
- AXELSSON, P. DEM Generation From *LASER* Scanner Data Using Adaptive *TIN* Model. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 16-23 Julho, Amsterdam, v. 33, n. B4, p. 109-110, 2000.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne LASER Scanning: existing systems and firms and other resources - **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 164-198, 1999.
- BARBER, D.; MILLS, J.; BRYAN, P. Laser Scanning and Photogrammetry: 21st Century Metrology, In: **CIPA 2001 International Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites Traditional and Modern Methods, Proceedings**, Alemanha, 2001.
- BEHAN, A. On the Matching Accuracy of Rastering Scanning LASER Altimeter Data. **The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 16-23 Julho, Amsterdam, v. 33, n. B3, 2000.
- BERVEGLIERI et al. **Cover Change Analysis Based on Temporal Gradients of the Forest Vertical Structure**, 2020. No prelo.
- BESL, P. J.; MCKAY, N. D. A method for registration of 3-D shapes. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 14, n.2, p. 239-256, 1992.
- BIENERT, A.; MAAS, H. Methods for the Automatic Geometric Registration of Terrestrial Laser Scanner Point Clouds in Forest Stands. **IAPRS**, 1-2 Setembro, Paris, v. 38, n. 3/W8, p. 93-98, 2009.
- BUCK, A. L. B. **Análise de métodos de filtragem em dados LASER scanner terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de Pinus spp.** 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, UFPR, Curitiba, 2012.
- CĂȚEANU, M.; ARCADIE, C. ALS for Terrain Mapping in Forest Environments: An Analysis of Lidar Filtering Algorithms. **EARSeL eProceedings**, v. 16, n. 1, p. 9-20, 2017, doi 10.12760/01-2017-1-02.

CLOUDCOMPARE v2.6.1 - **User Manual (2015)**. Disponível em: <<http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2018.

DAL POZ, A. P. Filtragem de dados de varredura a laser: Princípios e exemplos. *In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu – PR. Anais... São José dos Campos: INPE, v. 16, p. 6057-6064, 2013.

DASSOT, M.; CONSTANT, T.; FOURNIER, M. The use of terrestrial LIDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *In: Annals of Forest Science*, v.68, n.5, p. 959-974, 2011.

EL ISSAOUI, A. TLS Data October 2016 [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <tomaseli@fct.unesp.br> em nov. 2018.

FRIESS, P. **Empirical accuracy of positions computed from airborne GPS data**. In High Precision Navigation, Linkwitz, K. and U. Hangleiter (Eds.) Springer Verlag, Berlin and Heidelberg, Alemanha, p. 163–175, 1989.

FRÖHLICH, C.; METTENLEITER, M. Terrestrial *LASER* scanning – new perspectives in 3D surveying. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Freiburg, v. 36, n. 8/W2, p. 7-13, out. 2004.

HABIB, A. F. **Chapter 9 – Accuracy, Quality Assurance, and Quality Control of LiDAR Data**. Topographic Laser Ranging and Scanning – Principles and Processing, 2008.

HANSEN, E. H.; GOBAKKEN, T.; BOLLANDSÅS, O. M.; ZAHABU, E.; NÆSSET, E. Modeling Aboveground Biomass in Dense Tropical Submontane Rainforest Using Airborne Laser Scanner Data. **Remote Sensing**, v. 7, n.1, p. 788-807, 2015, doi 10.3390/rs70100788.

HE, Y.; LIANG, B.; YANG, J.; LI, S.; HE, J. An Iterative Closest Points Algorithm for Registration of 3D Laser Scanner Point Clouds with Geometric Features. **Sensors**, v. 17, n. 8, p 1862-1878, 2017, doi:10.3390/s17081862.

HOPKINSON, C.; CHASMER, L., YOUNG-POW, C., TREITZ, P. Assessing forest metrics with a ground-based scanning LIDAR. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, p. 573-583, 2004.

HYYPÄÄ, J. et al. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests, **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1339–1366, 2008.

HYYPÄÄ, H. et al. Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 3/W19, p. 85–90, 2005.

KHOSRAVIPOUR, A.; SKIDMORE, A. K.; ISENBURG, M.; WANG, T. J.; HUSSIN, Y. A. Generating pit-free Canopy Height Models from Airborne LiDAR. **PE&RS Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 80, n. 9, p. 863-872, 2014, doi:10.14358/PERS.80.9.863.

KILIAN, J., HAALA, N., ENGLISH, M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vienna, v. 31, n. B3, p. 383-388, 1996.

KRABILL, W. B. **GPS applications to laser profiling and laser scanning for digital terrain models**. Photogrammetric Week 1989, Wichmann Verlag, Heidelberg, Alemanha, 1989.

KRAUS, K.; MIKHAIL, E.M. **Linear least squares interpolation**. Photogramm. Eng., v. 38, n. 10, p. 1016-1029, 1972.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne *LASER scanner* data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 193-203, 1998.

LEÃO, T. D. S.; MELLO, A. A.; ALMEIDA, A. Q.; MOURA, M. A. Ajuste de modelos para estimativa do diâmetro de copa em uma área de reflorestamento misto na mata atlântica. **Revista Brasileira Biomas**, Lavras, v. 35, n. 3, p. 523-536, 2017.

LI, W. K.; GUO, Q. H.; JAKUBOWSKI, M. K.; KELLY, M. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud, **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 78, n. 9, p. 75-84, 2012.

LIANG, X. et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 63-77, 2016, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006.

LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure, **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 1, p. 88-106, 2003b.

LINDENBERGER, J. **Test results of laser profiling for topographic terrain survey**. Proceedings 42nd Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany, Wichmann Verlag, Heidelberg, Alemanha, p. 25-39, 1989.

LOCH, R. E. N.; SCHÄFER, A. G.; VARGAS, R. M. A. Filtragem e classificação de pontos laser scanner utilizando o software Terrascan. UFSC. **Geodésia Online**, 2004.

LOUDERMILK, E. L.; HIERS, J. H.; O'BRIEN, J. J.; MITCHELL, R. J.; SINGHANIA, A.; FERNANDEZ J. C.; CROPPER, W. P.; SLATTON, K. C. Groundbased LIDAR: a novel approach to quantify fine-scale fuelbed characteristics. **Int J Wildland Fire**, v. 18, n. 3, p. 676-685, 2009.

LUDWING BOLTZMANN INSTITUTE. Filtering algorithm. Disponível em: < <http://lbi-archpro.org/als-filtering/lbi-project/results/lastools/filtering-algorithm-2>>. Acesso em: 02 de jun. 2020.

MAAS, H.-G., BIENERT, A., SCHELLER, S., KEANE, E. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laserscanner data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579-1593, 2008.

MARTINS NETO, R. P.; Dados SVLA [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <laralopes@gmail.com> em set. 2018.

MARTINS NETO, R. P. **Extração de Variáveis Dendométricas em Árvores de Pinus taeda L. a partir de dados TLS e ALS**. Dissertação de Mestrado. 187 f. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2016.

MILLIKAN, P. H. K.; SILVA, C. A.; RODRIGUEZ, L. C. E; et al. Automated Individual Tree Detection in Amazon Tropical Forest from Airborne Laser Scanning Data. **Cerne**, v. 25, n. 3, p. 273-282, 2019, doi: 10.1590/01047760201925032630.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano de manejo da Estação Ecológica Mico-Leão-Preto**. Plano de manejo feito em conjunto com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Brasília, 2007. 259 p.

MIT. Visualizing Electromagnetism Course Notes. Disponível em: <<http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide01.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

PARIS, C.; KELBE, D.; AARDT, V.; BRUZZONE, L. A Precise Estimation of the 3D Structure of the Forest Based on the Fusion of Airborne and Terrestrial Lidar Data. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, p. 49-52, 2015, doi 10.1109/IGARSS.2015.7325694.

PARIS, C.; KELBE, D.; AARDT, V.; BRUZZONE, L. A Novel Automatic Method for the Fusion of ALS and TLS LiDAR Data for Robust Assessment of Tree Crown Structure. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 7, p. 3679-3693, 2017, doi 10.1109/TGRS.2017.2675963.

PEREIRA, J. P. **Extração automática de copas de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze a partir de dados LIDAR para estimativa de variáveis dendrométricas**. 2014. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, CAV - UDESC. Lages, 2014.

PFEIFER, N. KÖSTLI, A., KRAUS, K. Interpolation and filtering of laser scanner data - implementation and first results. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Columbus, v. 32, n. 3/1, p. 153-159, 1998.

RAPIDLASSO. **Creators of LAsTools, LASzip, and PulseWaves**. Disponível em <<https://rapidlasso.com/>>. Acesso em: 06 fev. 2018.

RIEGL. **Technical Data RIEGL LMS-Q680i**, 2012. Disponível em <<https://riegl.com>>. Acesso em 06 mar. 2018.

SIBSON, R. A brief description of natural neighbor interpolation (Capítulo 2). Em V. Barnett. **Interpreting Multivariate Data**. Chichester: John Wiley, p. 21–36, 1981.

ROUSSEL, Jean-Romain et al. lidR: Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. **R package version**, v. 1, n. 1, 2018.

SHELLER, S.; SCHNEIDER, D. Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. **Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3DMesstechnik** (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006, Hrsg. Th.Luhmann), Verlag Herbert Wichmann, p. 156-163, 2006.

SCHWARZ, K. P.; CHAPMAN, M.; CANNON, M.; GONG, P.; COSANDIER, D. **A precise positioning/attitude system in support of airborne remote sensing**. Proceedings of the GIS/ISPRS Conference, 6–10 Junho, Ottawa, Canada, 1994.

SHAN, J.; TOTH, C. K. (Ed.). **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. CRC Press, 2008, 593 p.

SILVA, M. N. **Aplicação de LASER scanner terrestre para determinação de variáveis dendrométricas em Pinus spp.** 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, UFPR, Curitiba, 2011.

SITHOLE, G., Filtering of LASER altimetry data using a slope adaptive filter. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, Annapolis**, v. 33, n. 3/W4, p. 203-210, 2001.

SITHOLE, G.; VOSELMAN, G. Comparison of Filter Algorithms. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 3/W13, p. 71-78, 2003.

SITHOLE, G.; VOSELMAN, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. **ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing**, v. 59, n. 1-2, p. 85–101, 2004.

STEREŃCZAK, K.; ZASADA, M.; BRACH, M. The Accuracy Assessment of DTM Generated from LIDAR Data for Forest Area - a Case Study for Scots Pine Stands in Poland. **Baltic Forestry**, v. 19, n. 2, p. 252-262, 2013.

TOMMASELLI, A. M. G. **Um Estudo Sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a Curta Distância**. GEODÉSIA Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia. 4 / 2003 [ISSN 1415-1111].

VAN LEEUWEN, M.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A. Canopy surface reconstruction from a LiDAR point cloud using Hough transform. **Remote Sensing Letters**, v. 1, n. 3, p. 125–132, 2010.

VAN LEEUWEN, M.; NIEUWENHUIS, M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. **European Journal of Forest Research**, v. 129, p. 749–770, 2010.

VÉGA, C.; DURRIEU, S. Multi-level filtering segmentation to measure individual tree parameters based on Lidar data: Application to a mountainous forest with heterogeneous stands, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 4, p. 646–656, 2011.

VOSSELMAN, G. Slope based filtering of *LASER* altimetry data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 16-23 Julho, Amsterdam, v. 33, n. B3, p. 935-942, 2000.

VOSSELMAN, G.; MAAS, H. –G. **Airborne and Terrestrial *LASER* Scanning**. Scotland, UK. Whittles Publishing, 2010. 342 p.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; DEWITT, B. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. New York. McGraw-Hill, 2000. 608 p.

YANG, C. S.; KAO, S. P.; LEE, F. B.; HUNG, P. S. Twelve different interpolation methods: a case study of Surfer 8.0. *In: Proceedings of ISPRS Congress*, v. 35, n. B2, p. 778–785, 2004.