

RORAI PEREIRA MARTINS NETO

**EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM
ÁRVORES DE *Pinus taeda* L. A PARTIR DE DADOS TLS E ALS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Florestal.

PROF. DR. MARCOS BENEDITO SCHIMALSKI

**LAGES, SC
2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com
auxílio do programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC**

Pereira Martins Neto, Rorai
Extração de variáveis dendrométricas em árvores
de *Pinus taeda* L. a partir de dados TLS e ALS /
Rorai Pereira Martins Neto. Lages - 2016.
187 p.

Orientador: Marcos Benedito Schimalski
Co-orientador: Veraldo Liesenberg
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado
de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Florestal, Lages, 2016.

1. LIDAR. 2. Modelos Digitais. 3. Extração
automática de árvores. 4. Inventário Florestal. I.
Benedito Schimalski, Marcos. II. Liesenberg,
Veraldo. III. Universidade do Estado de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal. IV. Título.

RORAI PEREIRA MARTINS NETO

EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM ÁRVORES DE *Pinus taeda* L. A PARTIR DE DADOS TLS E ALS

Dissertação referente ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias, pertencente à Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do título de mestre em Engenharia Florestal tendo como concentração a área de produção florestal.

Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Marcos Benedito Schimalski
Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV/UDESC

Membro:

Prof. Dr. Julio César Refosco
Fundação Universidade Regional de Blumenau – FURB

Membro:

Prof. Dr. Thiago Floriani Stepka
Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV/UDESC

Suplente:

Prof. Dr. Veraldo Liesenberg
Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV/UDESC

*A minha família, em especial
ao meu pai Rorai (in memorian)*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família, principalmente à minha mãe/avó Núbia Regina Rollo Martins por todo o apoio incondicional em minhas conquistas pessoais, disposição em me ajudar a realizar as mudanças para as cidades que vou e principalmente entender que a distância e a ausência são para um bem maior.

Ao meu orientador e amigo Prof. Marcos Benedito Schimalski, por todo o apoio para realização deste trabalho, pela confiança de que mesmo com meu trabalho de Professor em outro município eu concluiria o Mestrado da melhor maneira possível, pela disposição em sempre ir ao campo, pela troca mutua de conhecimentos nos campos da ciência Florestal e do Geoprocessamento e em seus ensinamentos sinceros e pacientes, me instigando a sempre fazer o meu melhor e ser cada vez melhor.

Ao meu co – orientador Prof. Veraldo Liesenberg, por todo o apoio para a realização deste trabalho e pela disposição em esclarecer as dúvidas em qualquer hora e local.

À Prof. Christel Lingnau da UFPR, que desde a graduação me “adotou”, ensinando – me com calma e paciência seus conhecimentos sobre Sensoriamento Remoto, SIG e principalmente a temática *LIDAR* aplicada à Ciência Florestal, sempre acreditando no meu potencial e na minha capacidade de ir mais longe.

As estagiárias do Laboratório de Geomática do CAV/UDESC, Tainara Boesing, Tamiles Rodrigues e Vanessa Almeida pela convivência diária, risadas e auxilio na coleta de dados e testes com os equipamentos.

Ao estagiário Thiaraju Neves Aquino, o qual se tornou um grande amigo, não só pela disposição para ir ao campo, como também pelos momentos de lazer e pela grande ajuda em se disponibilizar a realizar a minha mudança para Frederico Westphalen – RS.

Ao Engenheiro Florestal André Leonardo Bortolotto Buck pela orientação e ajuda no processamento dos dados TLS, principalmente nas etapas finais da dissertação.

Às grandes amizades que fiz no mestrado em especial, Alana Spanhol, Aline Debastiani, Dionéia Felippe, Juliana Dallabrida, Hadson Hoffer, Rafael Fracaso e Tásquila Loiola. Obrigado pelos jantares, conversas, momentos de descontração, desabafos, companhia, por me “obrigarem” a ir até Frederico Westphalen para o processo seletivo para professor substituto, hospedagem quando necessário e por todos os ótimos momentos que passamos juntos.

Aos meus companheiros de casa da república “Taco Solto” Daniel, Elvis, Filipe, Guilherme e Pedro pelas festas, risadas, companheirismo, discussões filosóficas, brigas pela louça suja e momentos em família frente à TV. A presença de vocês tornou a saudade da família muito menor.

Aos professores do Departamento de Engenharia Florestal da UFSM – CESNORS em Frederico Westphalen – RS, pelo auxílio nos meus primeiros passos como professor universitário e adaptação à cidade, em especial aos Professores Edner Baumhardt, Rafaelo Balbinot e Renato Spohrr na resolução das questões burocráticas.

Aos professores e colegas Celina Ceolin, Edson Perrando, Fabiano Fortes, Hilda Hildebrand (mamãe Hilda), Magda Zanon (Verônica) e Oscar Figueiredo pela convivência diária, momentos de descontração, auxilio nos “perrengues” com os alunos, almoços no chapão. Pela calorosa acolhida na cidade de Frederico Westphalen.

Aos meus adorados amigos de longa data Kessye, Gabriella, Luciano e Esteban, que sempre me apoiaram em toda e qualquer escolha que eu faça e com os quais eu posso contar sempre. E aos engenheiros florestais Cadu, Luani, Nathália, Regina, Tainá, Thiagão e Vinícius pela amizade durante a graduação que se estende até os dias de hoje, onde sempre teremos um churrasco nas férias para nos reencontrar, e ao Tiago de Conto pelas

conversas que sempre terminam em algoritmos para processamento de dados TLS.

À Valor Florestal por disponibilizar as suas áreas de plantio de *Pinus taeda* para a realização deste estudo, e a EMBRAPA Florestas pelo fornecimento dos dados ALS da área de estudo.

À MANFRA e CIA, LTDA pelo empréstimo do equipamento *Laser Scanner Leica P40* para a coleta de dados e ao Engenheiro Ricardo pelo acompanhamento em campo e auxílio nas etapas de pré – processamento.

Ao programa de Pós – Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina pela oportunidade deste mestrado e à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

E a todos que de alguma forma auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho meu MUITO OBRIGADO!!

RESUMO

MARTINS – NETO, Rorai Pereira. **Extração de variáveis dendrométricas em árvores de *Pinus taeda* L. a partir de dados TLS e ALS.** 2016. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Área: Produção Florestal/ Sensoriamento Remoto) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2016.

Novas técnicas de mensuração de árvores têm sido desenvolvidas para melhorar a precisão e qualidade das medidas dendrométricas realizadas. Dentre eles destaca-se a tecnologia *LIDAR*, com a qual é possível a obtenção de dados tridimensionais de alta precisão. Com isso, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o emprego das tecnologias *LIDAR* ALS (*Airborne Laser Scanner*) e *TLS* (*Terrestrial Laser Scanner*) para a obtenção de variáveis dendrométricas em plantios comerciais de *Pinus taeda*. A área de estudo, um talhão de 16 anos de idade sem tratos silviculturais, localizada em Doutor Pedrinho – SC, norte do estado, na Fazenda Cerro Azul, pertencente a empresa Valor Florestal. Foi selecionada uma parcela circular, de área igual a 400 m² foi instalada para realização dos estudos. Todas as árvores foram numeradas, marcadas e mensurados os DAPs e 10% das alturas foram medidas. Os dados *TLS* foram obtidos em campo com o equipamento *Leica Scanstation P40* em cinco diferentes posições de varredura para garantir que todos os fustes fossem recobertos por pontos *LASER*. A parcela também foi georreferenciada e tomados pontos com estação total no seu interior. A nuvem de pontos *ALS* foi fornecida pela EMBRAPA FLORESTAS em um voo realizado em janeiro de 2014. No decorrer dos 4 capítulos desta dissertação foi demonstrado o

estado da arte das tecnologias ALS e TLS na área florestal (capítulo 1); testados diferentes filtros para obtenção do MDT a partir dos dados ALS, comparados com os dados de estação total, no qual o filtro ATIN demonstrou os melhores resultados (capítulo 2); segmentação e delineamento das copas a partir da nuvem ALS e identificação automática de troncos na nuvem TLS, no qual a falta de desbastes e tratos silviculturais influenciou negativamente nos resultados (capítulo 3); e no capítulo 4 a comparação entre as variáveis dendrométricas obtidas pelo ALS e TLS com as modelagens de altura e volume obtidas em campo, na qual foi constatada diferenças estatísticas com os dados ALS para altura total e com os dados TLS para DAP e Volume por meio do teste estatístico de Dunnett, $\alpha = 5\%$. Por fim é dada uma conclusão geral acerca do tema explorado na dissertação, com recomendações para os trabalhos futuros

Palavras-chave: LIDAR, Modelos Digitais, Extração automática de árvores, inventário florestal.

ABSTRACT

MARTINS – NETO, Rorai Pereira. **Extraction dendrometric variables in *Pinus taeda* L. trees form TLS and ALS data.** 2016. 187 f. Dissertation (MSc in Forestry – Área: Forest Production/Remote Sensing) – University of the State of Santa Catarina. Graduate Program in Forestry, Lages, 2016.

New tree measurement techniques have been developed to improve the precision and quality of the dendrometric measurements performed. Among them the *LIDAR* technology stands out through which it is possible to obtain high precision three-dimensional data. Thereby the general objective of this work was to evaluate the use of the *LIDAR* ALS (Airborne Laser Scanner) and of the TLS (Terrestrial Laser Scanner) technologies for obtaining the dendrometric variables in commercial planting of *Pinus taeda*. The study area was a 16 years old plot without silvicultural treatment located in Doutor Pedrinho – North of the SC State, inside the Cerro Azul Farm owned by the Valor Florestal Company. A circular plot with 400 square meters was selected for the study. All the trees were numbered, marked and the DBHs and 10% of the heights were measured. The TLS data was obtained on the field with the *Leica Scanstation P40* equipment on five different sweep positions to assure that all the shafting were covered by *LASER* points. The parcel was also georeferenced and points were taken from its inside with the total station equipment. The ALS points cloud data was supplied by EMBRAPA FLORESTAS and was collected in a flight performed on Jan, 2014. The 4 chapters of this dissertation demonstrates the ALS and TLS technologies state of the art in the forestry field (chapter 1); different filters were tested for obtaining the DTM from the ALS data and

compared with the total station data where the ATIN filter presented the best results (chapter 2); segmentation and delineation of the treetops from the ALS cloud and automatic identification of the tree trunks in the TLS cloud in which the lack of thinning and silvicultural treatment had a negative impact on the results (chapter 3); and on chapter 4, the comparison of the dendrometric variables obtained through the ALS and TLS technologies with the heights and volume modeling obtained on the field presented statistic differences through the Dunnett statistic test ($\alpha = 5\%$) when compared with the ALS data for total height and the TLS for DBH and volume. Lastly it is given a general conclusion about the theme explored in the dissertation with recommendations for future work.

Keywords: LIDAR, digital models, threes authomatic extration, forest invetory.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.

Figura 1 – Princípio da varredura <i>LASER</i> por triangulação.....	33
Figura 2 – Princípio de varredura <i>LASER</i> mudança de fase.....	34
Figura 3 – Princípio da varredura <i>LASER</i> por tempo de percurso do sinal.....	35
Figura 4 – Varredura <i>LASER</i> terrestre em uma árvore, onde A) Varredura simples B) Varredura múltipla.....	38
Figura 5 – Ajuste de uma circunferência para a estimativa do diâmetro à diferentes alturas.....	42
Figura 6 – Componentes da varredura <i>LASER</i> aerotransportada	47
Figura 7 – Variações na aeronave devido à deriva.....	49
Figura 8 – Características dos sistemas ALS quanto ao retorno do pulso. A) Sistema de pulsos (<i>discrete echo</i>) B) Sistema de ondas contínuas (<i>full-waveform</i>)	50
Figura 9 – Localização da área de estudo (Imagen SRTM do estado de Santa Catarina; Recorte imagem Landsat 8 RGB 754 do município de Doutor Pedrinho; Imagem de intensidade da Fazenda Cerro Azul derivada do <i>LIDAR</i>)	55
Figura 10 – Equipamento <i>LASER scanner Optech Orion M – 200</i>	56
Figura 11 – Levantamento de dados com <i>LASER</i> aerotransportado na área da fazenda Cerro Azul	58
Figura 12 – Talhão de 16 anos onde foram realizados os experimentos.....	60
Figura 13 – Esquema da contagem das árvores na parcela circular.....	61
Figura 14 – A) Árvore pintada e com fita na altura do DAP; B) Medição do DAP com sutra.....	62
Figura 15 – A) <i>TruPulse 200</i> ; B) Medição da altura das árvores	63

Figura 16 – Equipamento <i>LASER</i> terrestre <i>Leica ScanStation P40</i> em campo.....	64
Figura 17 – Campo de visada do equipamento TLS.....	66
Figura 18 – Representação das estações <i>LASER</i> realizada na parcela para obtenção de dados de varredura múltipla das árvores.....	67
Figura 19 – Alvos plano refletores do tipo <i>Tilt & Turn</i> utilizados no levantamento TLS.....	68

CAPÍTULO 2 – AVALIAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MODELOS DIGITAIS DO TERRENO GERADOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE FILTRAGEM DA NUVEM DE PONTOS ALS.

Figura 1 – Exemplo das superfícies geradas no MDS e MDT	84
Figura 2 – Base do sistema GNSS	87
Figura 3 – Imagem de intensidade da nuvem de pontos ALS mostrando o recorte para a área referente ao talhão de 16 anos de idade	89
Figura 4 – Seleção de pontos do filtro <i>ATIN</i> baseado nos ângulos e distância	92
Figura 5 – Exemplificação do filtro morfológico desenvolvido por Chen <i>et al.</i> (2007a)	94
Figura 6 – Imagem de intensidade com a localização dos pontos levantados com estação total	97
Figura 7 – Modelos Digitais do Terreno gerados pelos diferentes métodos de filtragens para dados ALS e pela estação total. A) Filtro de Kraus & Pfeifer (1998); B) Filtro <i>ATIN</i> ; C) Filtro Morfológico de Chen <i>et al.</i> , (2007). D) Modelo paramétrico obtido por meio da Estação Total	98
Figura 8 – Comparação entre as curvas de nível nos diferentes MDT. A) Filtro de Kraus & Pfeifer (1998); B) Filtro <i>ATIN</i> ; C) Filtro Morfológico de Chen <i>et al.</i> , (2007). D) Modelo paramétrico obtido por meio da Estação Total	100
Figura 9 –Diferença entre o MDT filtrado e Estação Total A) Diferença para o filtro de Kraus & Pfeifer; B) Diferença para o filtro <i>ATIN</i> ; C) Diferença para o filtro morfológico de Chen..	102

CAPÍTULO 3 – USO DAS TECNOLOGIAS ALS E TLS PARA A IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES EM UMA PARCELA DE *Pinus taeda* L.

Figura 1 – Localização da parcela no talhão de 16 anos de <i>Pinus taeda</i>	115
Figura 2 – Fluxograma do processamento da nuvem ALS para o isolamento das árvores	116
Figura 3 – Polígonos de Thiessen	119
Figura 4 - Fluxograma do processamento da nuvem TLS para a identificação automática de árvores	120
Figura 5 – Modelos Digitais. A) MDT; B)MDS; C)MDSn	126
Figura 6 – MDSn suavizado com os picos das árvores	127
Figura 7 – Segmentação das árvores de <i>Pinus taeda</i>	128
Figura 8 – Fotografias das árvores do talhão	129
Figura 9 – Inconsistências na segmentação. A) Árvores suprimidas e não identificadas; B) Árvores identificadas erroneamente	130
Figura 10 – Recorte da nuvem de pontos registrada	133
Figura 11 – A) Nuvem de pontos recortada com detalhe da seção transversal; B) Seção transversal de 1 m; C) Cilindro representando o tronco de uma árvore	134
Figura 12 – Identificação de troncos na nuvem TLS	135

CAPÍTULO 4 – DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM ÁRVORES DE *Pinus taeda* L. POR MEIO DE DADOS LIDAR TERRESTRE E AEROTRANSPORTADO.

Figura 1 – Obtenção das alturas na nuvem ALS	152
Figura 2 – Árvore isolada na nuvem TLS com a representação de <i>outliers</i>	154
Figura 3 – Método do Ajuste da Circunferência Ótima	155
Figura 4 – Procedimento Seleção de Pontos	157
Figura 5 - Procedimento padrão (seção transversal = 0): (a) Primeira aplicação do procedimento Circunferência Ótima, (b) aplicação do procedimento Seleção de Pontos, (c) segunda aplicação do procedimento Circunferência Ótima	158
Figura 6 - Rotina do filtro Seções Transversais	159
Figura 7 – Distribuição dos resíduos dos modelos hipsométricos ajustados	163
Figura 8 – Distribuição dos resíduos dos modelos volumétricos ajustados	165
Figura 9 – Ajuste da linha de tendência entre A) Altura total e Altura ALS; B) Altura total e Altura TLS	166
Figura 10 – Ajuste da linha de tendência entre A) DAP e DAP ALS; B) DAP e DAP TLS	169
Figura 11 – Detalhe demonstrando imperfeição do tronco, a qual pode superestimar o DAP.....	170
Figura 12 – Ajuste da linha de tendência entre A) Volume e Volume ALS; B) Volume e Volume TLS	172
Figura 13 – A) Árvore Inteira; B) Ausência de dados após a filtragem dificultando a obtenção do volume total da árvore.....	173
Figura 14 – Comparação entre os valores obtidos pelo método paramétrico e processamento das nuvens ALS e TLS para as três variáveis mensuradas	175

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.

Tabela 1 – Comparação entre os sistemas ALS e TLS.....	32
Tabela 2 - Características técnicas do sistema <i>Optech Orion M-200</i>	57
Tabela 3 – Parâmetros do recobrimento aéreo <i>LIDAR</i>	58
Tabela 4 -Características técnicas do equipamento <i>Leica ScanStation P40</i>	65

CAPÍTULO 2 – AVALIAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MODELOS DIGITAIS DO TERRENO GERADOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE FILTRAGEM DA NUVEM DE PONTOS ALS.

Tabela 1 – Estatísticas dos MDTs	99
--	----

CAPÍTULO 3 – USO DAS TECNOLOGIAS ALS E TLS PARA A IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES EM UMA PARCELA DE *Pinus taeda L.*

Tabela 1 – Avaliação dos diferentes métodos de identificação automática das árvores	136
---	-----

CAPÍTULO 4 – DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM ÁRVORES DE *Pinus taeda L.* POR MEIO DE DADOS LIDAR TERRESTRE E AEROTRANSPORTADO.

Tabela 1 – Modelos Hipsométricos Ajustados	149
Tabela 2 – Modelos Volumétricos Ajustados	149
Tabela 3 – Estatística descritiva para a Altura Total, DAP e Volume utilizados no ajuste dos modelos hipsométricos e volumétricos.....	162

Tabela 4 – Parâmetros e estatísticas dos modelos hipsométricos ajustados	163
Tabela 5 – Parâmetros e estatísticas dos modelos volumétricos ajustados	164
Tabela 6 – Estatísticas descritiva para a variável altura total	166
Tabela 7 – Estatísticas descritiva para a variável DAP	168
Tabela 8 – Estatísticas descritiva para a variável volume	172
Tabela 9 – Teste de <i>Dunnett</i> comparando as variáveis dendrométricas nos diferentes métodos.....	177

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS – *Airborne LASER Scanner*

CCD - *Charge Coupled Device*

CHM – *Canopy Height Model*

DAP – Diâmetro à altura do peito

DBH – *Diameter at Breast Height*

DSM – *Digital Surface Model*

DTM – *Digital Terrain Model*

GPS - *Global Position Unit*

IMU – *Inertial Measurement Unity*

LASER – *Light Amplification by Simulated Emission of Radiation*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDSn – Modelo Digital de Superfície Normalizado

MDT – Modelo Digital de Terreno

TIN – Rede Triangular Irregular

TLS – *Terrestrial LASER Scanner*

VBA – *Visual Basic for Applications*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	26
1 INTRODUÇÃO.....	26
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	28
1.2 HIPÓTESES	29
1.3 OBJETIVO GERAL.....	30
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	30
2.1 VARREDURA LASER – ESTADO DA ARTE.....	30
2.2 VARREDURA LASER TERRESTRE	32
2.2.1 Aplicações Florestais do TLS	36
2.3 VARREDURA LASER AEROTRANSPORTADA	46
2.3.1 Aplicações Florestais do ALS	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 ÁREA DE ESTUDO	55
3.2 COLETA DE DADOS	56
3.2.1 Levantamento com ALS	56
3.2.2 Levantamento em Campo.....	59
3.2.3 Levantamento com TLS.....	63
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MODELOS DIGITAIS DO TERRENO GERADOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE FILTRAGEM DA NUVEM DE PONTOS ALS.....	81
1 INTRODUÇÃO.....	83

2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	86
2.1 COLETA DE DADOS EM CAMPO.....	86
2.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS ALS	88
2.2.1 Filtragem.....	89
2.2.2 Interpolação para criação do MDT e Comparação..	95
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4 CONCLUSÕES	106
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
CAPÍTULO 3 - USO DAS TECNOLOGIAS ALS E TLS PARA A IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES EM UMA PARCELA DE <i>Pinus taeda L.</i>.....	110
1.INTRODUÇÃO	112
2.MATERIAIS E MÉTODOS.....	114
2.1. INSTALAÇÃO DA PARCELA EM CAMPO	114
2.2. PROCESSAMENTO DA NUVEM ALS	115
2.2.1. Classificação dos pontos	116
2.2.2. MDSn	116
2.2.3. Suavização do MDSn	117
2.2.4. Detecção dos Picos das Árvores	117
2.2.5. Geração da Máscara de Lacunas	118
2.2.6. Segmentação por Polígonos de Thiessen.....	118
2.3. PROCESSAMENTO DA NUVEM TLS	120
2.3.1. Registro da Nuvem de Pontos	121
2.3.2. Delimitação da Parcela	122
2.3.3. Recorte de Seção Transversal	122
2.3.4. Algoritmo de Rotulação de Componentes Conexos	122
2.3.5. Identificação e Isolamento dos Troncos.....	124

2.4. AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS	124
3.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	125
3.1. MODELOS DIGITAIS.....	125
3.2. SEGMENTAÇÃO PELOS POLIGONOS DE THIESSEN 127	
3.3. REGISTRO E DELIMITAÇÃO DA PARCELA NA NUVEM TLS.....	132
3.4. RECORTE DE SEÇÃO TRANSVERSAL.....	133
3.5. IDENTIFICAÇÃO DOS TRONCOS.....	134
4.CONCLUSÕES.....	137
5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139
CAPÍTULO 4 - DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM ÁRVORES DE <i>Pinus taeda</i> L. POR MEIO DE DADOS LIDAR TERRESTRE E AEROTRANSPORTADO.....	143
1.INTRODUÇÃO.....	147
2.MATERIAIS E MÉTODOS	148
2.1. INVENTÁRIO FLORESTAL TRADICIONAL.....	148
2.1.1. Análise de Regressão	148
2.2. DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS NOS DADOS ALS	152
2.3. DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS NOS DADOS TLS	153
2.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS	160
3.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	161
3.1. AJUSTE DOS MODELOS HIPSOMÉTRICOS E VOLUMÉTRICOS	161

3.2. DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL ALTURA TOTAL	165
3.3. DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL DAP.....	168
3.4. DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL VOLUME	171
3.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS.....	174
4.CONCLUSÕES	178
5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	186

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1 INTRODUÇÃO

Técnicas, métodos e instrumentos de mensuração de árvores foram e continuam sendo aperfeiçoados para quantificação dos estoques florestais, visando aprimorar o processo de medição e disponibilizar dados confiáveis à tomada de decisão.

Mais recentemente, a incorporação das tecnologias *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) scanner baseados na tecnologia *LIDAR* (*Light Detection and Ranging*) tem apresentado grande potencial de aplicação na mensuração florestal. Sua utilização para este fim tem crescido nos últimos anos, fornecendo dados de forma rápida e precisa (LINGNAU *et al.* 2007).

Podendo ser dividido em ALS (*Airborne LASER Scanner* ou Varredura *LASER* Aerotransportada) e TLS (*Terrestrial LASER Scanner* ou Varredura *LASER* Terrestre), estes sistemas obtêm distâncias em relação aos objetos com precisão milimétrica. Com as distâncias calculadas em relação ao posicionamento do equipamento, e conhecendo-se o direcionamento do feixe *LASER*, determinam-se as coordenadas de cada ponto imageado (x, y, z). O resultado é uma nuvem de pontos tridimensionais que representa as feições geométricas dos objetos mensurados. Em geral, dependendo da configuração do equipamento e dos objetivos do trabalho, esta nuvem pode ser bastante densa podendo facilmente ultrapassar milhões de pontos com apenas alguns minutos de coleta.

O processamento da nuvem de pontos TLS em ambiente computacional permite a obtenção de variáveis dendrométricas e a geração de um modelo tridimensional do tronco da árvore, possibilitando a aquisição de diâmetros em diferentes alturas da

árvore, arquitetura de copa, ângulo de ramos, qualidade externa do fuste, reconstrução da estrutura da árvore, estimativa da área foliar, quantidade de biomassa e estudos de volumetria sem empregar métodos destrutivos (DASSOT *et al.*, 2011; MAAS *et al.*, 2008; BUCK, 2012).

Todavia, o uso do TLS é limitado a pequenas áreas como parcelas de inventário florestal e também devido à dificuldade obtenção de dados em florestas densas, mal manejadas e com grande presença de sub-bosque (LINGNAU *et al.*, 2009; LINGNAU *et al.*, 2010; GATZIOLIS *et al.*, 2010; SILVA, 2011; MARTINS NETO *et al.*, 2013a; BUCK, 2012).

A varredura *LASER* aerotransportada (ALS) em áreas de vegetação tem aplicabilidade em extensas áreas auxiliando no inventário florestal, sua alta densidade de pontos, é capaz de fornecer modelos acurados a respeito das copas das árvores e da altura da vegetação acima da superfície do solo. Isso é possível devido à pequena divergência dos pulsos *LASER*, permitindo sua penetração em áreas com vegetação. As suas aplicações no mapeamento de florestas estão relacionadas à geração de modelos digitais de terreno, estratificação da vegetação, reconstrução do perfil vertical da vegetação, extração de parâmetros biofísicos, estimativa de volume, biomassa e quantificação de carbono (BALTASAVIAS, 1999).

Porém, áreas com florestas densas dificultam e/ou impedem a penetração dos pulsos *LASER*, cuja nuvem de pontos pode gerar modelos digitais do terreno errôneos, além da dificuldade de obtenção de informações sobre o tronco das árvores, sendo necessário a utilização de modelos de regressão para a determinação de variáveis como DAP, volume ou base da copa.

No hemisfério norte e na Austrália, a integração de dados de vários sensores remotos é uma realidade melhorando a qualidade dos dados obtidos e ampliando a gama de informações a serem extraídas comparadas ao uso de dados de sensores

individuais e aos métodos tradicionais de coleta de dados em campo (WEZYK, 2012).

Baseado no exposto acima, este trabalho foi dividido da seguinte maneira:

- a) Capítulo 1: Introdução às tecnologias ALS e TLS empregadas no estudo, com seu estado da arte e as aplicações até então em ambiente florestal, considerações iniciais sobre esta pesquisa e a apresentação da dissertação.
- b) Capítulo 2: Emprego de diferentes filtros com o objetivo de classificar os pontos pertencentes ou não ao solo na nuvem ALS para gerar modelos digitais de terreno verificando a sua precisão com relação ao método direto obtido com a estação total.
- c) Capítulo 3: Identificação de árvores no povoamento por meio da extração automática de copas (nuvem ALS) e de troncos (nuvem TLS).
- d) Capítulo 4: Extração de variáveis dendrométricas diâmetros, altura e volume por meio das nuvens de pontos ALS e TLS e comparação com o inventário florestal convencional.
- e) Considerações Finais e recomendações para estudos futuros.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Ao se trabalhar com novas tecnologias, são necessários testes para verificar a sua aplicabilidade em condições específicas. Poucos estudos a nível nacional tratam da utilização ALS e TLS para a obtenção de variáveis de relevância para o inventário e o manejo florestal em plantios de *Pinus taeda*. O uso do ALS e TLS permita uma representação tridimensional da floresta, possibilitando assim o conhecimento de sua estrutura

de forma mais precisa que as obtidas pelas mensurações tradicionais.

Devido à importância destas tecnologias, o problema desta pesquisa é a obtenção das variáveis dendrométricas DAP, Altura Total e Volume por meio do processamento dos dados ALS e TLS, e para isso algumas questões deverão ser respondidas como: alocação ótima do equipamento TLS para melhor recobrimento de todas as árvores da parcela e evitar zonas de sombra, definir o melhor método para a separação dos pontos da nuvem ALS pertencentes ao solo e as árvores, eleger a melhor metodologia para a identificação e o isolamento das árvores presentes em uma parcela nas nuvem ALS e TLS, definir os métodos para a extração das variáveis dendrométricas nas nuvens de pontos e por fim comparação entre as variáveis dendrométricas obtidas com os dados de inventário tradicional para verificar a qualidade e a precisão das mensurações realizadas pelas tecnologias ALS e TLS.

1.2 HIPÓTESES

H0 = É possível a extração de variáveis dendrométricas por meio do processamento da nuvem de pontos ALS e TLS; e estas variáveis não diferem das variáveis coletadas por meio do inventário tradicional.

H1 = Existem diferenças estatísticas significativas entre as mensurações obtidas pelos métodos tradicionais de inventário comparados com os processamentos dos dados derivados dos sistemas ALS e TLS.

1.3 OBJETIVO GERAL

Extração de variáveis dendrométricas a partir de dados *LASER scanner* terrestre e *LASER scanner* aerotransportada em um plantio não manejado de *Pinus taeda* com 16 anos de idade.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I) Definir um método adequado de filtragem dos pontos ALS pertencentes ao solo e às árvores para a geração do MDT (modelo digital de terreno);
- II) Identificar automaticamente as copas e os fustes das árvores presentes na parcela nas nuvens de pontos ALS;
- III) Extrair as variáveis dendrométricas de interesse (diâmetros, altura e volume) nos dados *LASER ALS* e *TLS* e
- IV) Comparar os resultados obtidos pelo processamento das nuvens *ALS* e *TLS* com os obtidos pelo inventário florestal tradicional em campo (suta e hipsômetro).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 VARREDURA *LASER* – ESTADO DA ARTE

O *LASER* foi inventado por Theodore H. Maiman na década de 1960, cujos principais precedentes para o desenvolvimento foram a emissão estimulada de radiação luminosa, cujo estudo previa a possibilidade de estimular um corpo a liberar energia com características constantes e uniformes em forma de radiação eletromagnética (GONÇALES, 2007, SILVA *et al.*, 2013).

As características da luz *LASER* são: monocromaticidade, alta intensidade, direção e coerência

(BAGNATO, 2001), sendo esta última a sua propriedade mais importante, pois devido a coerência todos os raios de luz individuais possuem o mesmo comprimento de onda e estão em fase, ou seja, alinhados. Com isso a energia emitida não é dissipada (BRANDALIZE & PHILIPS, 2002; BUCK, 2012; CARROLL, 1978; SILVA, 2011).

Os sistemas de varredura *LASER* constituem um método onde uma superfície é varrida usando a tecnologia *LASER*. Estes sistemas fazem uma análise do ambiente para a coleta de dados e levam em consideração a geometria e a aparência dos objetos. Os dados medidos, podem então ser utilizados para a reconstrução e criação de modelos tridimensionais, úteis para uma ampla variedade de aplicações. A vantagem da varredura *LASER* é a possibilidade de gravar um grande número de pontos com precisão milimétrica em um curto espaço de tempo (LEONARDO da VINCI, 2008).

A nomenclatura para o sistema *LASER* é apontada por autores que defendem a ideia de *LADAR* (*LASER Detection and Ranging*), outros que preferem o termo *LIDAR* (*Light Detection and Ranging*). No Brasil é comum a utilização dos termos "*LASERscanner*" e "varredura *LASER*" (DALMOLIN e SANTOS, 2004).

As tecnologias de varredura *LASER* atuais podem ser divididas em duas categorias: estáticos e dinâmicos. Quando o equipamento é mantido em uma posição fixa durante a aquisição de dados, ele é chamado de estático, ou varredura *LASER* estática. As vantagens em se utilizar este sistema estão na alta precisão dos dados e alta densidade de pontos (WUTKE, 2006; LEONARDO da VINCI, 2008).

Já no caso dinâmico, o equipamento está montado em uma plataforma móvel (por exemplo um avião). Estes equipamentos requerem sistemas de posicionamento adicionais, tais como IMU (*Inertial Measurement Unit*) e GPS (*Global Position Unit*), que torna o sistema mais complexo e caro (LEONARDO da VINCI, 2008). As vantagens estão na grande

área que pode ser levantada em um recobrimento aéreo e a obtenção de dados acerca do terreno. Como exemplo de sistema dinâmico podemos citar a varredura *LASER* aerotransportada.

A Tabela 1, mostra uma comparação entre os sistemas ALS e TLS, e os tópicos a seguir serão abordadas as suas principais características e aplicações florestais.

Tabela 1 – Comparação entre os sistemas ALS e TLS.

	ALS	TLS
Plataforma	Aérea	Terrestre (tripé)
Sistema de Varredura	<i>Discrete-echo</i> <i>Fullwave form</i>	<i>Triangulated</i> <i>Phase-difference</i> <i>Time-of-flight</i>
Distância de Operação	1000 – 4000 m	50 – 300 m
Taxa de Aquisição de Dados	Até 50 pontos/m ²	Até 500 pontos/m ²
Sistema de Coordenadas	Baseado no GNSS e IMU	Cartesianas
Vantagens	Aquisição de dados 3D em grandes áreas	Nuvem de pontos densa de elevada precisão
Desvantagens	Dificuldade em obtenção de dados do solo em vegetação densa	Grande divergência do pulso em elevadas distâncias e fatores ambientais

*Fonte: produção do próprio autor.

2.2 VARREDURA *LASER* TERRESTRE

Os sistemas TLS são classificados de acordo com seu princípio de medição, a saber: triangulação (*Triangulated Scanner*), mudança de fase (*Phase-difference*) ou tempo de percurso do sinal (*Time-of-flight*).

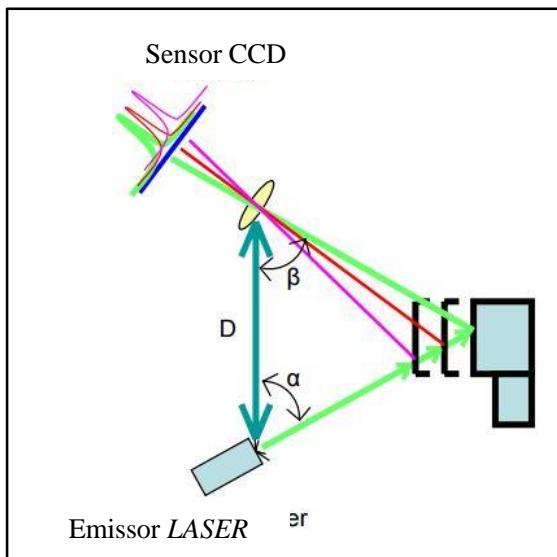
Equipamentos para coleta de dados em distâncias curtas (abaixo de 50 m) utilizam o princípio de medição por triangulação, em que um pulso *LASER* é emitido pelo sistema e

a luz refletida pelo objeto é registrada por sensores CCD's (*Charge Coupled Device*) e transformam a luz refletida em sinais elétricos que por sua vez, são convertidos em bits (WUTKE, 2006).

A distância entre o sensor CCD e o emissor *LASER* é conhecido, assim como o ângulo de emissão do feixe (α). O ângulo (β) pode ser determinado examinando a direção do feixe *LASER* no campo de visão do sensor CCD. Com essas três informações é possível determinar a forma e o tamanho do triângulo e consequentemente a localização tridimensional do objeto (Figura 1).

É possível a obtenção de precisão milimétrica empregando este tipo de medição, e é mais utilizada em aplicações industriais e monitoramento de processos de construção (FRÖHLICH e METTENLEITER, 2004).

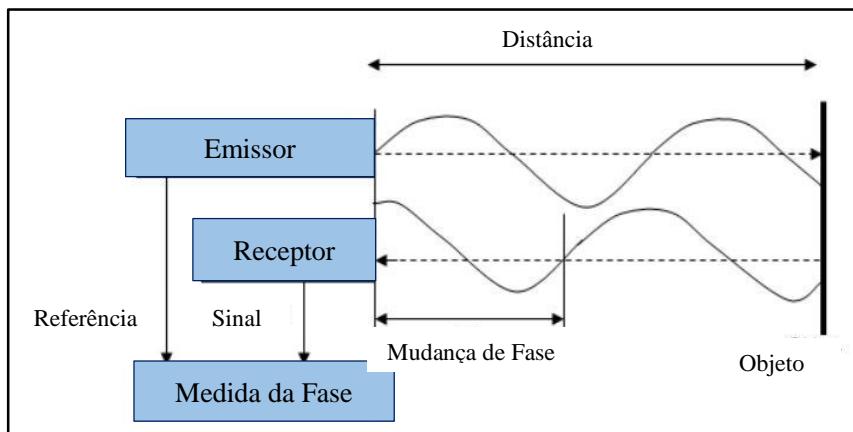
Figura 1 – Princípio da varredura *LASER* por triangulação.



Fonte: adaptado de Leonardo da Vinci, 2008.

Os sistemas de medição baseados em mudança de fase utilizam o princípio da modulação da energia do feixe *LASER*. A luz emitida é modulada em amplitude e disparada sobre uma superfície (Figura 2). A reflexão espalhada é coletada e um circuito mede a diferença de fase entre as formas de ondas enviadas e recebidas (FRÖHLICH e METTENLEITER, 2004). Estes sistemas oferecem altas taxas de aquisição de dados, porém a principal desvantagem é a faixa restrita em que estes dados podem ser coletados (até 150 m), chamada de coerência. Acima desta coerência, os valores coletados resultam em distâncias erradas que se confundem com a distância correta de outros objetos (SILVA, 2011).

Figura 2 - Princípio da varredura *LASER* por mudança de fase.

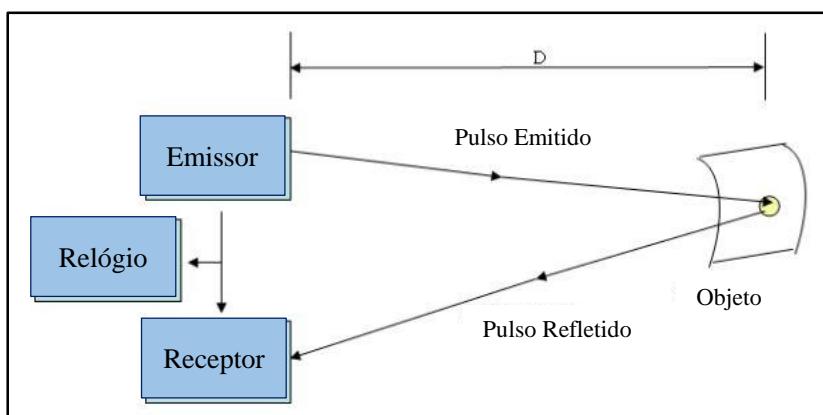


Fonte: adaptado de Leonardo da Vinci, 2008.

A tecnologia mais utilizada por sistemas TLS são os baseados no tempo de percurso do sinal. Esta técnica permite mensurações inequívocas de pequenas distâncias até várias centenas de metros. Traz como vantagem a medição de distâncias superiores a 100 metros sem problemas de ambiguidade e com uma precisão bastante razoável (FRÖHLICH e METTENLEITER, 2004).

O sistema de medição é baseado na equação geral da velocidade, razão entre distância e tempo. Esses modelos enviam pulsos *LASER* que atingem e são refletidos pelos objetos, uma vez que é conhecida a velocidade da luz, a metade do tempo que o pulso levou desde sua saída do *scanner* até seu retorno é utilizada para calcular a distância do sistema de varredura equipamento ao objeto (MÁRQUEZ, 2010). O pulso é emitido pelo equipamento e o relógio contador (com precisão de aproximadamente 3,33 pico segundos) é iniciado. Após ser refletido por um objeto, o sinal retorna para um receptor que interrompe a contagem de tempo (Figura 3).

Figura 3 – Princípio da varredura *LASER* por tempo de percurso do sinal.



Fonte: adaptado de Leonardo da Vinci, 2008.

Neste estudo, o equipamento TLS utilizado possui o princípio de medição baseado no tempo de percurso do sinal para realizar as medições.

2.2.1 Aplicações Florestais do TLS

Inicialmente, a varredura *LASER* foi aplicada em obras de engenharia, arquitetura, geologia e mineração. Na área florestal, atualmente, têm sido feitas muitas pesquisas para o desenvolvimento de metodologias para obter informações da floresta. Com esta tecnologia é possível obter parâmetros florestais que antes eram de difícil obtenção (KIRÁLY e BROLLY, 2010).

A obtenção de dados em um povoamento florestal de forma convencional, demanda muito tempo. Uma vez que o processo de coleta é muitas vezes demorado, pode gerar erros na medição das variáveis causadas muitas vezes por falha humana, além da ocorrência de erros por má operação de equipamentos ou por condições adversas, como vegetação densa ou até cansaço da equipe (HOPKINSON *et al.* 2004). Esses empecilhos podem ser superados através da aquisição de dados com a varredura *LASER* (PÁL, 2008).

Apesar de pouco utilizada no Brasil, a varredura *LASER* terrestre se apresenta como uma ferramenta promissora, visto que por meio do processamento da nuvem de pontos da superfície do tronco, é possível reconstituir a sua geometria com alta precisão e rapidez. Esta reconstituição é possível por meio do processamento da nuvem de pontos tridimensional, a qual permite a modelagem e determinação de variáveis dendrométricas, como diâmetros em alturas parciais, altura total e volume, sem a derrubada da árvore (BIENERT *et al.*, 2006a; MAAS *et al.*, 2008). Desde 2003, estudos têm sido realizados sobre a aplicabilidade do *LASER* terrestre na área florestal (DASSOT *et al.*, 2011).

De acordo com Buck (2012) ao se trabalhar com o processamento da nuvem de pontos (dado obtido a partir da varredura *LASER* tanto ALS como TLS, em que cada ponto possui coordenada X, Y, Z) para extrair informações dendrométricas é possível destacar uma sequência de etapas à

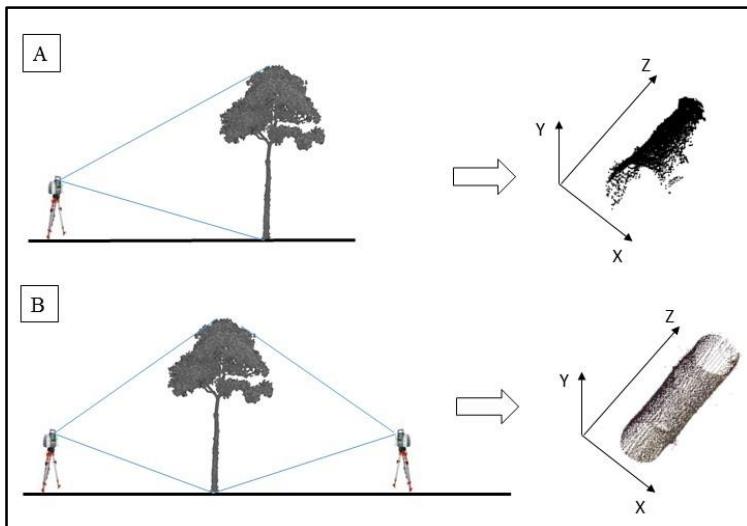
serem realizadas: 1) identificação de árvores; 2) separação entre a superfície do terreno e a base da árvore; 3) obtenção de variáveis dendrométricas; 4) filtragem e modelagem do tronco.

2.2.1.1 Tipos de Varredura

A tomada de dados com o TLS pode ser realizada de duas maneiras: varreduras simples ou varreduras múltiplas. Quando o equipamento é instalado somente em um ponto (ou seja, é realizada somente uma estação *LASER*) os pulsos *LASER* recobrem parcialmente o objeto de interesse, resultando assim em uma varredura simples. Porém, quando o equipamento é instalado em diferentes pontos (ou seja, são realizadas várias estações *LASER*) os pulsos *LASER* recobrem toda a superfície do objeto de interesse, têm-se então uma varredura do tipo múltipla (SILVA, 2011; BUCK, 2012; SILVA *et al.*, 2013).

A Figura 4 demonstra o resultado de uma nuvem de pontos obtida por varredura simples e outra por varredura múltipla. É possível notar pela seção do fuste que na varredura simples a nuvem de pontos forma uma semicircunferência e na varredura múltipla uma circunferência completa.

Figura 4 – Varredura *LASER* terrestre em uma árvore, onde A) Varredura simples B) Varredura múltipla.



Fonte: adaptado de Martins Neto *et al.*, 2013b.

Na medição de árvores, os dados de varredura simples representam apenas parte do fuste, enquanto que dados de varredura múltipla podem representar o fuste completo (THIES e SPIECKER, 2004).

A geração de uma nuvem de pontos de varredura simples apresenta benefícios referentes ao menor tempo de coleta de dados em campo e também à praticidade por dispensar alvos para a posterior união ou registro, característica particular à geração da varredura múltipla (LIANG *et al.*, 2008). Embora seja possível processar dados de varredura simples para obtenção das variáveis altura e diâmetro, muitas vezes é preciso realizar o recobrimento total de uma árvore para inferir sobre sua forma e realizar estudos volumétricos, informações que só podem ser alcançadas no processamento da varredura múltipla (BUCK, 2012).

Ao se utilizar a varredura múltipla do objeto de interesse, o nível de detalhamento é muito maior. Neste caso, a necessidade de distribuição de alvos (planos ou esféricos) para o registro, transporte e reinstalação do equipamento *scanner* em locais distintos pode onerar, em tempo, o processo de coleta de dados bem como o volume de dados a serem processados (BIENERT *et al.*, 2006b).

2.2.1.2 Identificação Automática

Para estudos a nível de parcela, ou quando o objetivo é a obtenção de dados de muitas árvores é importante, por motivos de tempo de processamento, que a identificação das árvores existentes na cena seja realizada de forma automática (ASCHOFF & SPIECKER, 2004). No entanto, nada impede que a identificação e isolamento sejam realizados manualmente, por meio de *softwares* de visualização da nuvem de pontos, principalmente quando se trabalha com indivíduos e não com parcelas (LINGNAU *et al.*, 2009).

Um método proposto por Simonse *et al.* (2003), Aschoff e Spiecker (2004) e Bienert *et al.* (2007) para identificação automatizada de árvores denominado de *Hough*, identifica a tendência do fuste em formar circunferências. A transformação *Hough* realiza cortes de pequenas espessuras a uma determinada altura do solo. A imagem visualizada por este corte permite identificar que no local onde estavam as árvores, aparecerão as seções transversais do tronco nas determinadas espessuras. No caso de varreduras simples resultam em semicircunferências e de varreduras múltiplas circunferências completas. Com este algoritmo, foi possível a identificação de 90% das árvores em floresta natural de coníferas na Alemanha (SIMONSE *et al.*, 2003). Os 10% das árvores que não foram possíveis de serem identificados estavam encobertas por pequenos galhos ou sombreadas por outras árvores.

Avaliando as distâncias de varredura para a identificação automática de árvores, Liang *et al.* (2008) determinaram que a distância de até 10 metros do *scanner* todas as árvores foram identificadas corretamente pelo método automatizado. A partir dos 10 metros até os 60 metros, dividindo os resultados em classes de 10 m de amplitude, cerca de 70% das árvores foram encontradas automaticamente sendo a detecção manual considerada como parâmetro de comparação.

Liang *et al.* (2012), desenvolveram um algoritmo para a detecção de árvores, oriundas de varreduras simples, com base em mapeamento de fustes utilizando cilindros em parcelas circulares de 10 m de raio em florestas boreais da Finlândia, cuja densidade é de 1022 árv.ha⁻¹. Neste estudo foi possível a detecção de 73% das árvores, porém para melhores resultados, os autores recomendam a combinação de varreduras simples (sem o registro da nuvem de pontos), aplicação das varreduras múltiplas (com o registro) e uma edição mais interativa das nuvens de pontos.

Liang e Hyypä (2013) utilizando a mesma metodologia e área de estudo de Liang *et al.* (2012), porém para dados de varredura múltipla identificaram automaticamente 95,7% das árvores das parcelas.

Em regeneração de plantios jovens, Li *et al.* (2014) utilizaram de segmentação e posteriormente métodos manuais de edição em *software* para dados *LASER* para identificação de árvores na nuvem de pontos. Das 438 árvores do estudo, 431 foram identificadas corretamente. As oclusões foram causadas devido à dificuldade em se identificar e isolar algumas árvores com grande presença de galhos e sub-bosque.

Testando a influência no modo de varredura, Pueschel *et al.* (2013) comentam que utilizando varreduras simples a probabilidade de ocorrência de sombra e consequentemente oclusão de árvores na identificação é muito maior. Neste caso é indicado que se use não apenas as seções transversais a 1,30 para a identificação automática, como também outras porções no

fuste, principalmente em zonas com baixo número de pontos, aumentando consideravelmente a taxa de detecção.

2.2.1.3 Determinação de Variáveis Dendrométricas

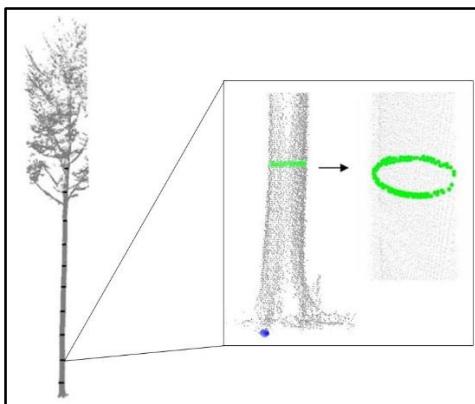
Hopkinson *et al.* (2004), um dos pioneiros no estudo da aplicabilidade da varredura *LASER* terrestre na área florestal, comparou a obtenção de variáveis dendrométricas por meio da varredura *LASER* com os métodos tradicionais de campo. As variáveis utilizadas para este estudo foram DAP (Diâmetro a altura do peito, medido a 1,30 m do solo) e altura total da árvore. Os resultados mostraram 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 DAP não houve uma tendência significativa nas sub e superestimativas, tanto que, em comparação com o método convencional foi observado uma alta correlação ($R = 0,92$).

Varreduras simples e múltiplas foram testadas por Thies e Spiecker (2004) para a medição de diâmetro a altura do peito (DAP), altura total e altura da base da copa em comparação aos métodos tradicionais de medição, utilizando suta e fita métrica. Os resultados obtidos na determinação do DAP por meio dos dados *LIDAR* quando comparados aos métodos tradicionais (suta e fita) indicaram um desvio padrão de 1,3%.

A análise da nuvem de pontos 3D para a extração automática das variáveis dendrométricas: diâmetros a diferentes alturas e altura total das árvores em parcelas foram realizadas por Bienert *et al.* (2006a). Os diâmetros foram determinados por meio do ajuste de uma circunferência no corte da seção transversal da altura do DAP em determinada espessura, prosseguindo com o mesmo método para as demais seções (Figura 5). O erro observado para o DAP foi de 1,5 cm. Já a altura total foi medida pelo *LASER* através modelo digital do terreno, em que se encontrou a média dos pontos mais baixos

das árvores. A subtração entre o ponto de maior e de menor cota gera a altura total. O erro médio para esta variável foi de 80 cm

Figura 5 – Ajuste de uma circunferência para a estimativa do diâmetro à diferentes alturas.



Fonte: Adaptado de Bienert *et al.*, 2006a.

Li *et al.* (2014) utilizando um método semiautomático na obtenção de diâmetros, no qual a árvore é recortada manualmente em seções de 5 cm e depois o diâmetro é mensurado com uma ferramenta de distância de pontos. Com isso é obtido o diâmetro máximo e mínimo para cada seção, e com a média destes valores têm-se o diâmetro da seção. Já a altura total foi medida por meio da subtração entre o ponto de maior cota e o da base da árvore. Comparado com o inventário de campo, os erros para o diâmetro estiveram entre 0,52 e 0,95 cm e os erros na obtenção da altura das árvores estiveram abaixo de 25 cm. Como a obtenção das variáveis dendrométricas utilizaram métodos manuais, as medições estão mais passíveis de erros que os métodos automatizados.

Para a determinação da altura total, alguns autores utilizam o MDT (Modelo Digital de Terreno) devido à alta quantidade de pontos de solo comparado ao ALS, assim é

possível encontrar o ponto mais baixo de cada árvore, possibilitando a obtenção de alturas totais e parciais ao longo do fuste, facilitando e automatizando a determinação de diâmetros a diferentes alturas utilizados em cálculo de volume (BIENERT *et al.*, 2006b).

Embora o MDT facilite a automatização dos procedimentos, é possível a medição de alturas sem o seu uso diminuindo a complexidade dos algoritmos, realizando uma simples subtração entre o ponto de maior cota pelo ponto de menor cota da árvore (SILVA, 2011).

Ao trabalhar com *Fagus silvatica* e *Quercus* sp em florestas polonesas., Wezyk *et al.* (2007) relataram a dificuldade de medição da altura das árvores com o *LASER* terrestre, devido a densidade de galhos que dificultam a obtenção de dados nas partes mais altas das árvores, e consequentemente, os pontos de maior cota mesmo com a utilização do MDT onde os erros foram de 1,10 e 0,79 m respectivamente. Em contrapartida, as medições de diâmetro foram muito precisas, em comparação com o método tradicional ($R = 0,97$).

Outros autores como Hopkinson *et al.* (2004) com estudos em *Pinus resinosa* e *Acer saccharum*; Watt *et al.* (2003) em áreas com misto de *Picea sitchensis* e *Pinus contorta*; Wezyk *et al.* (2007) em florestas de *Fagus silvatica* e *Quercus* sp e Lingnau *et al.* (2009); Silva. (2011); Martins Neto *et al.* (2012); Martins Neto *et al.* (2013a), em árvores de *Pinus taeda*, e Li *et al.* (2014) em plantios heterogêneos de regeneração com 9 espécies também relatam super e subestimativas na determinação da altura total, e atrelam este erro a alta densidade das copas, e a grande presença de galhos impedindo a obtenção de pontos *LASER* nas partes mais altas das árvores.

A obtenção de diâmetros a diferentes alturas também foi testada por Lingnau *et al.* (2009), Lingnau *et al.* (2010) e Martins Neto *et al.* (2013a). Os métodos testados com *LASER* foram validados com a classificação digital das seções transversais nas alturas testadas. Até a altura da copa, os diâmetros foram muito

bem determinados, acima disto podem ser encontrados obstáculos na medição de diâmetros na parte superior das árvores em função de suas copas.

Como os dados TLS representam todos os pontos que estão no campo de visada do equipamento, a varredura de uma árvore terá outros elementos como galhos, pontos de solo e sub-bosque. Sendo assim faz-se necessário o desenvolvimento de filtros para eliminar pontos de ruído ao longo do tronco antes da modelagem tridimensional (LINGNAU *et al.*, 2009).

Bienert *et al.* (2006b) descreve um filtro baseado em uma distância máxima que os pontos podem estar do objeto de interesse. Um cilindro cujo raio é a distância máxima permitida em relação ao alvo é confeccionado eliminando os pontos que estão fora deste limite.

Litkey *et al.* (2008) utilizaram o ajuste de uma linha aos pontos de varredura *LASER* afim de eliminar pontos que se desviasssem da tendência linear. Desta forma foi possível excluir pontos referentes a galhos e ramificações que estavam na direção do *scanner*. Para este ajuste, pontos encontrados mais afastados da média, no valor de duas vezes o desvio-padrão, foram descartados, resultando na filtragem de pontos pertencentes ao tronco da árvore.

Quatro diferentes filtros foram testados por Buck (2012) em árvores de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. O filtro distância máxima foi considerado o melhor, filtrando até 75% do tronco. Acima disto, o autor relata que a baixa qualidade dos resultados nas porções superiores das árvores são um reflexo da ausência de dados que representam a superfície do tronco em função da interposição da copa entre o pulso *LASER* e o fuste da árvore.

As rotinas de filtragem são capazes de isolar o tronco de forma automática e fornecer dados aptos à modelagem, porém, a ausência de pontos que representam a superfície do tronco inviabiliza a sua total reconstituição. Nesse caso, é recomendada a aplicação de métodos estimativos do volume do tronco após o adensamento da copa (Buck *et al.*, 2014).

Em plantios florestais o volume das árvores é economicamente a variável mais importante de ser obtida, e para isso são cubadas árvores que abrangem toda a amplitude diamétrica e serviram posteriormente como variável dependente para o ajuste de equações que estimam o volume das árvores com o uso de variáveis mais simples de serem obtidas como DAP e a altura total (Martins Neto *et al.*, 2015).

Como a cubagem das árvores é um método destrutivo, os dados TLS surgem como uma alternativa para a obtenção desta variável, para isso são empregadas diferentes técnicas de modelagem tridimensional da nuvem de pontos para o volume.

Buck *et al.* (2012) determinaram o volume de uma árvore de *Pinus elliottii* localizada em um povoamento inequíâneo, sem espaçamento regular estabelecido por meio da dispersão de sementes de indivíduos próximos, por meio de dados *LASER* de varredura múltipla. A filtragem foi feita manualmente por meio de seleção e recorte dos *outliers*, posteriormente a árvore foi segmentada em toras de 1 m para então determinar o volume por meio da modelagem tridimensional utilizando rede triangular irregular (*TIN*). Comparando os resultados obtidos pelo processamento dos dados *LASER* com a cubagem pelo método de Huber e o volume das toras pelo deslocamento de água, o volume foi bem estimado nas porções inferiores do tronco. Acima, de 5 m a presença de galhos inseridos junto ao tronco ocasionou a superestimação do volume obtido com o modelo tridimensional. Este fato está ligado a deficiência no processo de filtragem, ficando caracterizada a dificuldade de determinar um limiar entre tronco e galhos. Por esse motivo, é sugerida a interpolação para a estimativa dos diâmetros em porções do fuste onde não podem ser determinados, pela pequena quantidade de pontos (GATZIOLIS *et al.*, 2010).

Em uma parcela de *Eucalyptus* spp, com tratos silviculturais, Buck *et al.* (2014) determinou o volume de árvores por meio do processamento de dados TLS. A filtragem desta vez foi feita de maneira automática, com um filtro denominado de

distância máxima, em que os pontos acima de um certo limiar são considerados como *outliers* do tronco. Posteriormente, utilizou-se a mesma metodologia de Buck *et al.* (2012) para a determinação do volume. Comparando com a cubagem pelo método de Smalian, foi possível modelar as toras até 40% da altura total, com uma leve subestimativa dos dados *LASER* em relação a cubagem tradicional. Os autores relatam que pode ter havido problemas na coleta de dados como distribuição dos alvos e presença de vento, o que causa ambiguidade nas porções mais altas do tronco, impossibilitando a estimativa do volume pelo método automatizado nessas porções do tronco.

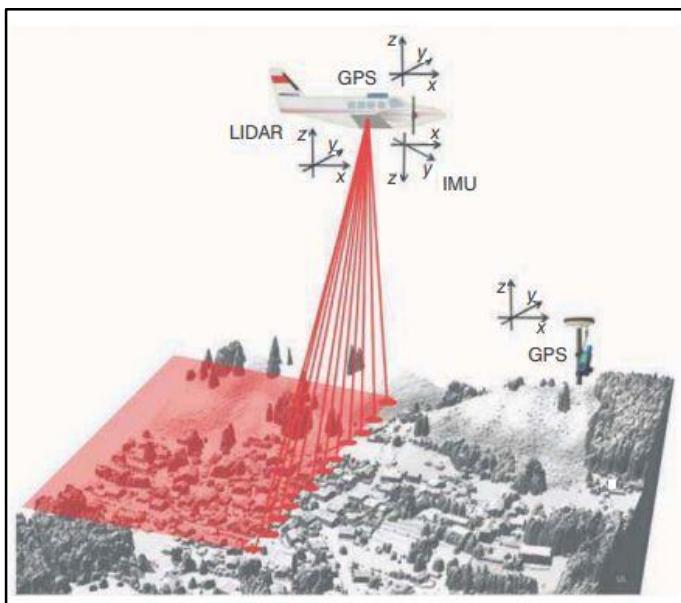
Uma técnica baseada no *voxel* (pixels tridimensionais) em que o volume de madeira é estimado considerando o espaço vazio no interior da circunferência formada pela nuvem de pontos foi realizado por Bienert *et al.* (2014). Primeiramente, a nuvem de pontos das árvores é filtrada para a remoção de *outliers*, depois são ajustados os *voxels* para os pontos que formam a circunferência representando a casca da árvore e por fim o espaço vazio dentro da nuvem de pontos também é preenchido por *voxels*, utilizando a borda da casca como limiar. Somando os dois valores, é obtido o volume da árvore. Os resultados obtidos com este método foram comparados com os obtidos pelo xilômetro utilizando os segmentos de fuste livre de galhos, e indicaram uma pequena subestimativa utilizando o método do *voxel* para determinação do volume (0,3%) e relataram que os métodos para determinação de volume necessitam de uma boa filtragem para remoção completa dos galhos e que o registro da nuvem de pontos e a estrutura da árvore influenciam nos resultados.

2.3 VARREDURA *LASER* AEROTRANSPORTADA

A varredura *LASER* aerotransportada é realizada a partir de plataformas aéreas (aeronaves, helicópteros e atualmente os drones). A técnica de mensuração é baseada em dois componentes principais (Figura 6): um sistema de varredura

LASER, cujo sensor mede o tempo em que o pulso é emitido da plataforma e o tempo de retorno (reflexão pelos objetos no terreno) da luz, juntamente com a intensidade do pulso recebido; e um sistema de posicionamento global/sistema inercial de navegação (GPS/IMU) que servem para determinar a posição e orientação do sistema na superfície terrestre (BALTSAVIAS, 1999; VOSSELMAN & MAAS, 2010).

Figura 6 – Componentes da varredura *LASER* aerotransportada.



Fonte: Vosselman & Maas, 2010, p.21.

O conjunto do sistema de varredura *LASER* compreende a mecânica e a óptica de digitalização. O sistema é montado no buraco da fuselagem de uma aeronave e envia pulsos (com comprimento de onda na região do infravermelho próximo) em alta frequência em direção à superfície enquanto a aeronave está em movimento. Dependendo da altura de vôo e velocidade da aeronave, é possível obter densidades de medição entre 0,2 até

160 pontos.m⁻² (VOSSELMAN & MAAS, 2010; ZANDONÁ, 2006; KUMAR, 2012).

O Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS) é a tecnologia que permite a localização do pulso *LASER* na superfície terrestre, e seu funcionamento está baseado na utilização de dois receptores que registram, em conjunto, a aquisição de coordenadas (x, y, z) e armazenam informações do posicionamento da aeronave durante o voo (RIBAS, 2011; GONÇALVES, 2012; PEINHOPF, 2012).

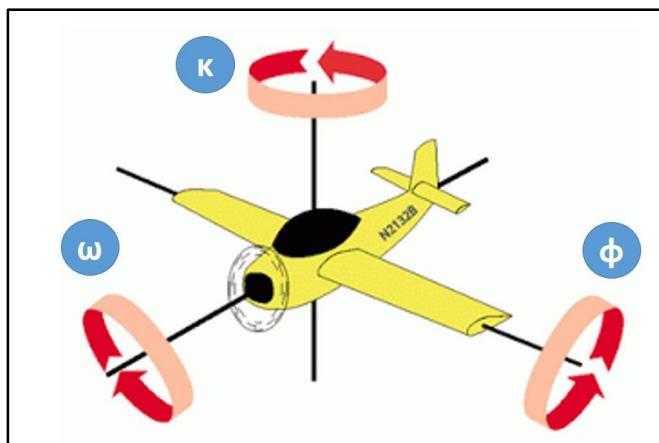
As observações obtidas pelo GPS na aeronave passam por correções posicionais por meio de métodos de posicionamento diferencial, com base em estações de referência para a correção de erros sistemáticos (GIONGO *et al.*, 2010). Com isso é possível obter o georreferenciamento dos pontos em um determinado sistema de projeção cartográfico.

A unidade de medição inercial (IMU) é fixada diretamente ao equipamento *LASER* em uma plataforma estável. Ela grava dados de aceleração e velocidade de rotação. Os dados de aceleração são utilizados para apoiar a interpolação da posição da plataforma na trajetória registrada pelo GPS, enquanto que as taxas de rotação são utilizadas para a determinação da orientação da plataforma. A combinação do GPS e de dados do IMU permitiu a reconstrução da linha de voo com uma precisão superior a 10 cm (JENSEN, 2011; VOSSELMAN & MAAS, 2010).

A reconstrução da linha de voo é importante, pois durante a trajetória a aeronave está suscetível à deriva (Figura 7). Essas derivas causam movimentos de rolamento (ω), os quais provocam o não alinhamento entre as varreduras consecutivas devido ao movimento de curva para a direita ou esquerda no eixo longitudinal do avião; a arfagem (ϕ) que provoca superposição ou lacunas entre varreduras consecutivas, ocasionada pelo movimento em torno do eixo transversal do avião e a guinada (κ) que é o deslocamento em torno do eixo vertical que provoca

o não alinhamento entre as varreduras (COELHO & BRITO, 2007; PEREIRA, 2014)

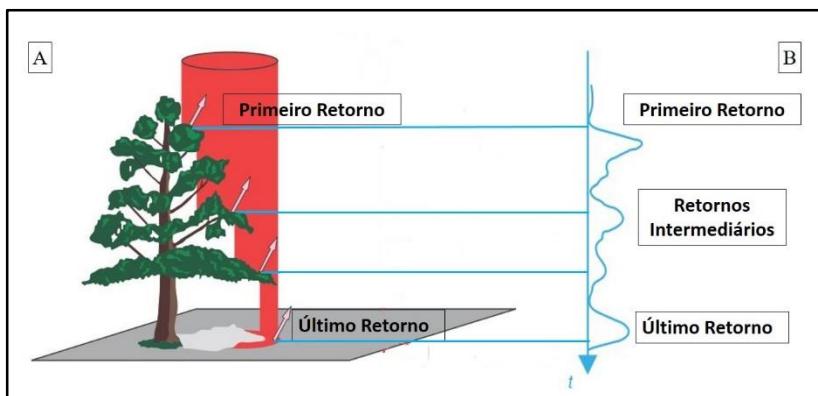
Figura 7 – Variações na aeronave devido à deriva.



Fonte: produção do próprio autor.

As principais características que diferem os sistemas *LASER* estão relacionados com a largura do feixe emitido e a forma como a intensidade de retorno é gravada. Quanto à largura do feixe, ele pode ser classificado como *small footprint*, quando o diâmetro do raio *LASER* projetado é normalmente inferior a um metro, ou *large footprint* quando o diâmetro é superior a cinco metros (BORTOLOT & WYNNE, 2005). Já com relação aos retornos, os primeiros sistemas ALS eram do tipo *discrete echo* (sistemas de pulsos), no qual o sensor registra o intervalo entre o primeiro retorno (referente à superfície dos objetos no terreno) e o último retorno (referente ao solo). Com o avanço da tecnologia, novos sistemas ALS foram construídos cujo retorno pode ser classificado como *full-waveform* (ondas contínuas) em que o sensor registra não somente o primeiro e o último retorno, mas sim todos os retornos intermediários, registrando integralmente todo o sinal dos pulsos *LASER* (Figura 8).

Figura 8 – Características dos sistemas ALS quanto ao retorno do pulso. A) Sistema de pulsos (*discrete echo*) B) Sistema de ondas contínua (*full-waveform*).



Fonte: adaptado de Vosselman & Maas, 2010.

Neste estudo, os dados utilizados são advindos de um sistema do tipo *discrete echo*.

2.3.1 Aplicações Florestais do ALS

A tecnologia ALS teve seu uso inicial aplicado à medição de alturas. Na década de 1980, o Serviço Florestal Canadense demonstrou a aplicabilidade no uso de dados *LASER* aerotransportado para estimar alturas, diâmetro de copa e densidade de cobertura vegetal, bem como a representação do terreno (MDT) abaixo da vegetação (LIM *et al.*, 2003; GONÇALVES, 2012).

Os estudos iniciais fixaram-se nos métodos de filtragem da nuvem de pontos para classificar pontos pertencentes ao solo, aos não pertencentes ao solo e posteriormente geração de modelos digitais (KRAUS & PFEIFER, 1998; VOSSELMAN, 2000; AXESSELSON, 2000).

As pesquisas com dados derivados de *LASER scanner* possibilitam a determinação da altura das árvores, variáveis dendrométricas, biomassa entre outros mediante o uso de modelos de regressão em que as variáveis independentes são a altura das árvores e/ou diâmetro de copa (FRIEDLAENDER e KOCH, 2000).

Uma subestimativa na determinação da altura média das árvores foi obtida por Næsset (1997) com um desvio padrão variando de 1,1 – 1,6 metros quando comparado com alturas obtidas com Vertex. O erro está atrelado a divergência do *LASER*, que influencia na penetração dos pulsos no solo. Assim, quanto menor a divergência do pulso, maior a capacidade de atingir o solo, principalmente em áreas com maior densidade de copas.

Utilizando a variável altura, Drake *et al.* (2002) definiram um modelo de regressão para estimar a biomassa em floresta tropical úmida na Costa Rica comparando com dados obtidos a partir de parcelas em campo. Os resultados obtidos indicaram que o modelo foi capaz de explicar 94% da variância da biomassa.

Næsset (2002) estimou a altura média das árvores, altura dominante, diâmetro médio, número de árvores, área basal e volume de madeira em 144 parcelas, baseado em modelos de regressão pelo método *stepwise* utilizando métricas de dados *LASER* do primeiro e último retorno e também os quantis relacionados à altura e densidade da copa, em florestas jovens e adultas da Noruega. Comparando com as técnicas tradicionais de inventário florestal para obter estas variáveis, os seguintes desvios foram encontrados: altura média (0,89 m); altura dominante (1,02 m); diâmetro médio (1,44 cm); número de árvores (19,45%); área basal (10,15%) e volume (12,80%), indicando alta precisão na estimativa destas variáveis exceto o número de árvores e área basal.

Utilizando percentis de observações ALS de 10 até 90%, bem como a densidade dos pontos nos respectivos percentis, a

altura média e o desvio padrão destes pontos, Zonete (2009) ajustou modelos de regressão pelo método *stepwise* com as variáveis supracitadas para estimar diâmetro médio, altura média, altura dominante, área basal e volume das parcelas amostradas em povoamentos de *Eucalyptus* sp. A raiz quadrada dos erros médio (RQEM %) e o coeficiente de determinação (R^2) para os modelos ajustados foram as seguintes: RQEM% = 0,0004 e $R^2=0,88$ para o diâmetro médio; para a altura média RQEM% = 0,0003 e $R^2=0,94$; RQEM% = 0,0003 e $R^2=0,96$ para altura dominante e para área basal e volume foram $R^2=0,92$ e $R^2=0,945$; RQEM% = 0,0016 e RQEM% = 0,0025 respectivamente. Sendo assim a tecnologia ALS gera observações com alta capacidade para estimar as variáveis dendrométricas de relevância para o inventário florestal. O autor comenta em realizar as análises não a nível de parcela, mas a nível de árvores individuais para melhores resultados.

Peinhopf (2012) estimou a variável DAP em povoamentos de *Eucalyptus* sp., por meio da altura obtida com dados *LASER* de diferentes densidades de pontos (5 e 10 pontos/m²). O menor erro obtido, comparado ao inventário tradicional, foi de 5,46% com a densidade de 10 pontos/m² na idade de 3 anos, devido à maior penetração dos pulsos *LASER* no terreno, possibilitando obter a altura de maneira mais precisa para os modelos de regressão na estimativa do DAP.

O volume de madeira em povoamentos de *Eucalyptus* sp. foi estimado por meio de dados ALS, com uso de modelos de regressão cujos dados de entrada foram à altura total, obtidos diretamente por meio do MDSn (modelo digital de superfície normalizada) com os dados *LASER* e o DAP por meio de relações hipsométricas invertidas com dados de altura total *LASER*. O DAP apresentou coerência com dados de inventário, com uma leve tendência a subestimativa, consequentemente na variável volume total de madeira no talhão, a qual foi de 11,4%. Os autores atrelam este erro a subestimativa da altura total das árvores com os dados ALS (em média 5%) o que impactou na

estimativa das outras variáveis, no caso o DAP e o volume total (OLIVEIRA *et al.*, 2014a).

Devido aos erros encontrados para a identificação de árvores, métodos para a detecção de árvores individuais e delineamento das copas na nuvem de pontos *LASER* tem sido aprimorados.

Dois métodos podem ser utilizados para esta detecção e delineamento de copas, a saber: manual, em que os pontos visualizados no topo do Modelo Digital de Superfície Normalizada (MDSn) são delineados ao redor da copa de cada árvore utilizando interpretação visual da geometria da copa, e automático em que são utilizadas técnicas de processamento de imagens (HYYPAA & INKINEN, 1999). Os mesmos autores citaram que os números de pulsos *LASER* devem variar de 3 a 5 (ou mais) pontos.m⁻² para que seja possível o reconhecimento de árvores individuais.

Koch *et al.* (2006) apresentaram uma abordagem para delinear as copas de árvores individuais em florestas decíduas e temperadas da Alemanha. Primeiramente, as possíveis copas foram detectadas no modelo digital de superfície normalizado (MDSn) suavizado dividido em com o uso de um filtro de máxima local. Posteriormente, as copas foram delineadas com a combinação de um algoritmo *pouring*, baseado no conhecimento sobre a forma das árvores, detectando vetores a partir dos topos das árvores delimitando a copa e as bordas. Os resultados comparados com medições em campo indicaram um acerto de 87,3%. A omissão foi causada pela tendência do método em fundir as copas em povoamentos densos.

Zandoná *et al.* (2008) realizaram um estudo em plantio de 40 anos de *Pinus taeda* em que foi utilizado um algoritmo de máximas locais para a individualização das árvores, no qual foi gerada uma imagem a partir dos pontos *LIDAR* relativos à vegetação e um filtro para suavização da imagem, e delimitaram as copas utilizando as partes mais altas das árvores por meio de um algoritmo de crescimento de regiões. Foram identificadas

corretamente 82,8% das árvores. O erro está ligado alta densidade de árvores em algumas parcelas, impedindo a penetração direta dos feixes *LASER* no terreno.

Utilizando a suavização do MDSn para realçar os pixels de maior cota, e individualização das árvores por meio dos polígonos de Thiessem Kumar (2012) identificou 96% das árvores em uma floresta nativa de coníferas na França.

Em áreas de campos de altitude com remanescentes de araucária, Pereira (2014) realizou a identificação das árvores de *Araucaria angustifolia* utilizando a mesma metodologia citada acima. A acurácia chegou a 91,7% das árvores, a oclusão está relacionada à estrutura de copa das árvores de araucária que dificultam o isolamento da árvore. Comparando com a altura total medida com *TruPulse*, o erro utilizando os modelos digitais foi de 0,19 m e utilizando a regressão linear para determinar o DAP por meio do diâmetro de copa, o erro foi 3,1 mm comparados com as medidas obtidas com suta.

Oliveira *et al.* (2014b) utilizaram um filtro de máxima local para a identificação das árvores em um povoamento de *Eucalyptus* sp em diferentes idades (3, 5 e 7 anos). O método consiste na identificação dos locais de máxima intensidade de brilho da imagem em bandas individuais. Assim, as áreas com mais brilho refere - se ao topo das copas. A janela móvel utilizada foi de 5 m x 5 m, adequadas para o espaçamento 4 m x 3 m daquele plantio. O maior erro encontrado foi de 6,38% para a idade de 5 anos. Este erro é devido as árvores suprimidas (abaixo das dominantes) que não foram passíveis de identificação.

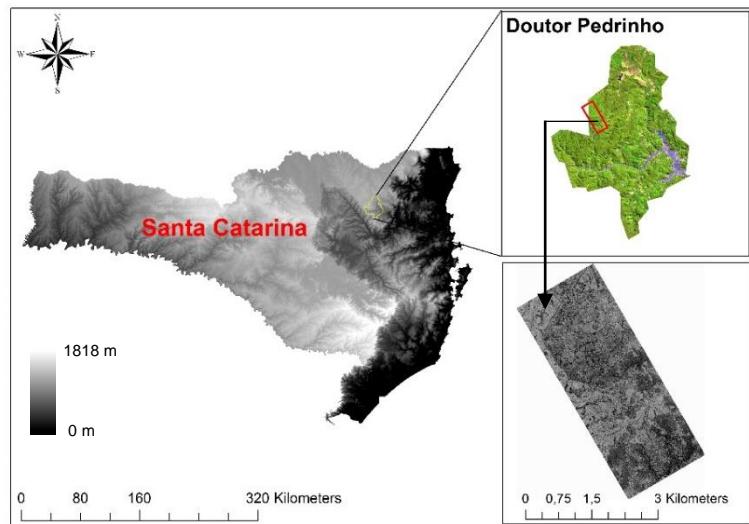
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em um talhão de *Pinus taeda* L. de 1,79 ha, com idade de 16 anos, sem tratos silviculturais, localizados na fazenda Cerro Azul, pertencentes a empresa Valor Florestal localizada no município de Doutor Pedrinho – SC (Figura 9).

De acordo com a classificação climática de Köppen o clima da região é classificado como Cfa (subtropical úmido) com temperatura média de 19,7 °C, verões quentes, e invernos amenos a frios. A precipitação média é de 2.000 mm/ano (IBGE, 2014).

Figura 9 – Localização da área de estudo – A) Imagem SRTM do estado de Santa Catarina; B) Recorte imagem Landsat 8 RGB 754 do município de Doutor Pedrinho; C) Imagem de intensidade da Fazenda Cerro Azul derivada do *LIDAR*.



Fonte: produção do próprio autor.

3.2 COLETA DE DADOS

3.2.1 Levantamento com ALS

Os dados foram adquiridos através de um sistema a LASER aerotransportado modelo *Optech Orion M – 200* (Figura 10), pela empresa Geoid *Laser Mapping*, com sede em Belo Horizonte – MG, para atender ao projeto Paisagens Sustentáveis II da EMBRAPA Florestas. As características técnicas do equipamento podem ser vistas na Tabela 2.

Figura 10 – Equipamento *LASER scanner Optech Orion M – 200*.



Fonte: Optech Orion M-300 Specsheets, s/d.

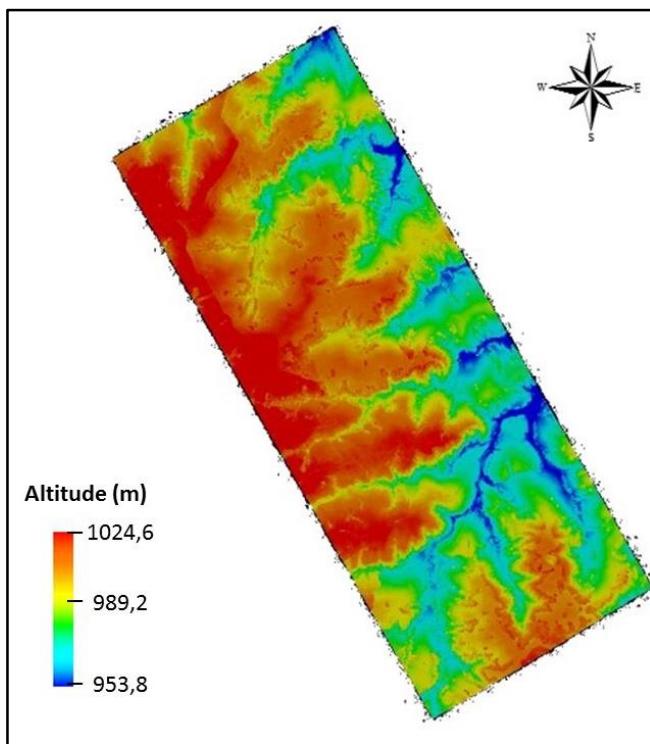
Tabela 2 - Características técnicas do sistema *Optech Orion M-200*.

Parâmetro	Especificação
Distancia operacional	200 - 2500 m AGL
Acurácia horizontal	Melhor que 50 cm (escala 1:1.000 PEC “A”)
Acurácia vertical	Melhor que 15 cm
Sistema de posicionamento	POS AV™ 510 (OEM) - GPS/GNSS/L-Band receiver
Frequência emissão	Programável: 200 kHz máximo
Frequência de escaneamento	Programável: 70 Hz máximo
Ângulo de escaneamento (FOV)	Programável: 50° máximo
Retornos possíveis	Até 4 medições para cada pulso, incluindo o último
<i>Intensity capture</i>	Gravação de 12-bits
Gravação dos dados	Gravação 100% digital em HD interno

Fonte: adaptado de Optech Orion M-300 Specsheets, s/d.

O voo para a coleta de dados *LASER* da fazenda Cerro Azul, foi realizado em janeiro de 2014. Dos 3.769,2 ha totais da fazenda, o levantamento *LASER* comprehende aproximadamente 1000 ha (Figura 11). Os parâmetros do levantamento aéreo com o *LIDAR* podem ser vistos na Tabela 3.

Figura 11 – Levantamento de dados com *LASER* aerotransportado na área da fazenda Cerro Azul.



Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 3 – Parâmetros do recobrimento aéreo *LIDAR*.

Altura de voo	853 m
Ângulo de Varredura	11°
Frequência de Varredura	67,5 hz
Frequência do Sistema	100 KHz
Recobrimento das Linhas de Voo	65% (<i>overlap</i>)

O tipo de sistema utilizado foi o de pulsos (*discrete echo*) onde o primeiro retorno refere-se à porção mais elevada dos objetos, aqui no caso as copas das árvores (importantes para a geração de modelos digitais de superfície e de copa) e o último retorno refere-se aos pontos de solo (utilizado para a geração do modelo digital do terreno). O total de pontos foi 221.943.124 pontos, separados em 149.317.674 no primeiro retorno e 72.625.450 no último retorno. A densidade média foi de 22,16 pontos/m²

Os dados foram estruturados como um arquivo .txt onde cada linha refere-se ao pulso *LASER* e as colunas respectivamente as coordenadas E, N, h em projeção UTM, intensidade do sinal, número e quantidades de retornos.

A nuvem de pontos já estava pré – processada, com as devidas correções entre GPS, IMU para determinar a posição tridimensional dos pontos na superfície, bem como a trajetória da aeronave e alinhamento da mesma. O sistema de referência utilizado foi o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico das Américas) e o fuso UTM 22 S.

Estes dados foram utilizados nas etapas de filtragem para criar o modelo digitais de terreno (MDT), modelo digital de superfície (MDS), modelo digital de superfície normalizada ou modelo digital de copas (MDSn). Os modelos digitais serviram posteriormente para as etapas de identificação e isolamento das copas; e determinação de variáveis dendrométricas conjuntamente. Os processamentos dos dados para as etapas acima serão especificados em seus respectivos capítulos

3.2.2 Levantamento em Campo

O levantamento em campo teve como intuito servir como valor paramétrico para a comparação entre as diferentes metodologias testadas e verificar a confiabilidade dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias.

Como a empresa não realiza os tratos silviculturas em seus plantios, optou-se por um talhão mais velho (16 anos de idade) com pouco sub-bosque e com desrama natural das árvores (Figura 12). O espaçamento inicial era de 2,5 x 2,5 m. Estas condições são necessárias para o levantamento com o TLS, conforme dito no tópico 2.2.1.3.

Figura 12 – Talhão de 16 anos onde foram realizados os experimentos.

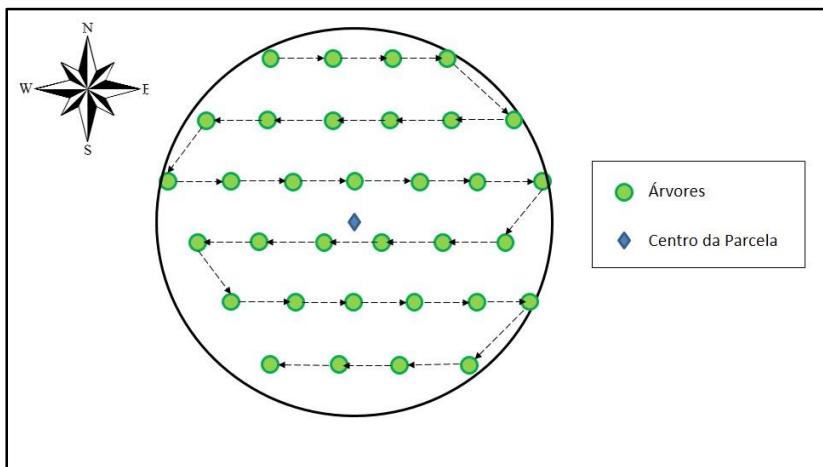


Fonte: produção do próprio autor.

Foi instalada em campo uma parcela circular, com 400 m². O centro foi definido como um ponto aleatório em que foi instalado um piquete. A partir deste ponto, foi puxada uma corda com comprimento de 11,28 m para a direção noroeste, e todas as árvores que estavam dentro do limite da parcela foram numeradas em zigue-zague com tinta spray branca (Figura 13).

Como o objetivo do trabalho não é realizar o inventário com o TLS e ALS, e sim verificar a qualidade dos dados para as medições de variáveis dendrométricas, não foi levada em conta a suficiência amostral de um inventario.

Figura 13 – Esquema da contagem das árvores na parcela circular.



Fonte: produção do próprio autor.

Além de numeradas, cada árvore da parcela foi marcada com uma fita na altura DAP (Diâmetro altura do peito). Esta variável foi mensurada com suta *mantax blue*, da marca Haglöf Sweden, duas vezes em cada árvore em direções ortogonais (norte e leste), e posteriormente tomada a média (Figura 14).

Figura 14 – A) Árvore marcada com tinta e fita na altura do DAP; B) Medição do DAP com suta.



Fonte: produção do próprio autor.

A numeração serviu para auxiliar na identificação das árvores na nuvem de pontos e comparar seus diâmetros individuais obtidos em campo e por meio dos dados *LASER*.

A altura total foi obtida por meio do *TruPulse 200* em 10% das árvores presentes na parcela (Figura 15), e nas demais foi estimada por meio de equações hipsométricas a partir de dados de inventário contínuo fornecidos pela empresa, visto que não foi possível realizar o corte para obtenção da altura total com a trena e também na dificuldade em se obter a altura em campo devido a densa galhada das árvores. Esta etapa é discutida melhor em seu respectivo capítulo.

Figura 15 – A) *TruPulse 200*; B) Medição da altura das árvores.



Fonte: produção do próprio autor.

3.2.3 Levantamento com TLS

Após a instalação da parcela em campo, foi realizado o levantamento com o TLS. O equipamento utilizado foi disponibilizado pela empresa MANFRA LTDA, modelo P40 (Figura 16), fabricado pela *Leica Geosystems*.

Figura 16 – Equipamento *LASER* terrestre *Leica ScanStation P40* em campo.



Fonte: produção do próprio autor.

O equipamento tem um sistema de varredura estático e utiliza o princípio de medida de tempo de percurso de sinal (*time-of-flight*) e já possui um computador e baterias embutidas. Na Tabela 4, pode ser visto um resumo das características técnicas do equipamento.

Tabela 4 – Características técnicas do equipamento *Leica ScanStation P40*.

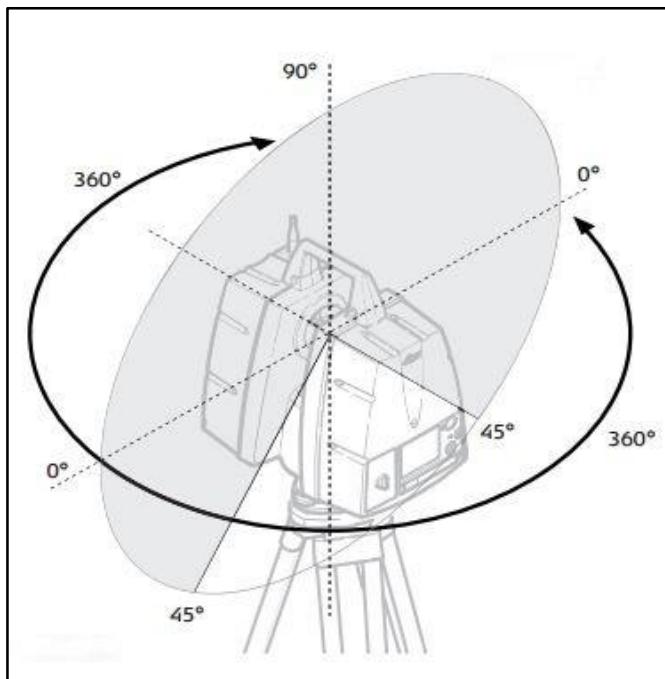
Características Técnicas	
Taxa de aquisição de pontos	1.000.000 pontos/segundo
Distância Máxima de Operação	270 m
Acurácia Posicional	3 mm até 50m/6 mm até 100m
Acurácia Distância	1,2 mm
Acurácia Angular	8"
Comprimento de Onda	658 nm/1550 nm
Dimensões (L x C x H)	23,8 cm x 35,8 cm x 39,5 cm
Peso (com as baterias)	12,65 kg

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

O equipamento possui um espelho rotativo que tem como intuito direcionar os pulsos *LASER*, além de servir também como uma câmera fotográfica digital RGB de 4 megapixels para cada $17^\circ \times 17^\circ$, que serve para a obtenção de varreduras coloridas da cena, já que é atrelado a cada pulso *LASER* um valor de RGB.

O espelho rotativo permite a obtenção de dados verticais compreendidos entre os limites de 45° abaixo e 90° acima da linha horizontal traçada em relação ao seu centro ótico, e 360° na horizontal em torno do eixo onde foi instalado, com isso o campo de visada (*Field of View – FOV*) do equipamento é de 360° na horizontal e 270° na vertical. (Figura 17).

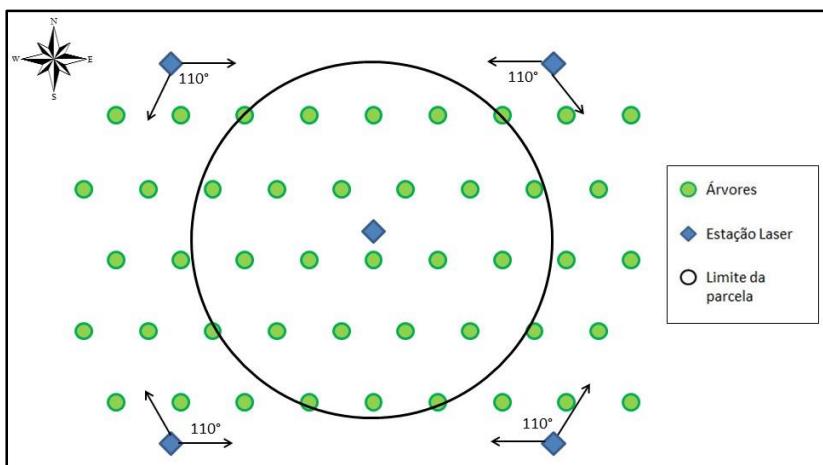
Figura 17 – Campo de visada do equipamento TLS.



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

O equipamento TLS foi instalado em um tripé topográfico em cinco diferentes pontos na parcela implantada anteriormente, sendo um coincidente com o centro e os outros quatros nos extremos (Figura 18). Esta configuração foi realizada de forma que fossem obtidos dados de varredura múltipla das árvores presentes na parcela, evitando possíveis oclusões devido à sombra, ou pontos de ruído.

Figura 18 – Representação das estações *LASER* realizadas na parcela para obtenção de dados de varredura múltipla das árvores.



Fonte: adaptado de Martins Neto *et al.*, 2015.

A resolução de varredura adotada foi de um ponto a cada 6,3 mm e optou-se por não registrar fotografias, devido ao aumento no tempo de coleta dos dados e do arquivo final dos dados.

Quando há a necessidade de georreferenciar a nuvem de pontos, ou quando se trabalha com varreduras múltiplas, faz-se necessária à instalação de alvos no momento da varredura, que servirão como referência para a transformação das coordenadas das varreduras em um sistema de referência. Esta etapa denomina-se registro, e será explicada no Capítulo 3. Para isso, utilizou-se alvos plano - refletores circulares do tipo *Tilt & Turn* (inclinação e rotação), com diâmetro de 45 mm. As cores características (preto e branco), são utilizadas devido a diferenças de brilho e facilitam a identificação dos alvos pelos algoritmos para a realização do registro da nuvem de pontos (Figura 19).

Figura 19 – Alvos plano refletores do tipo *Tilt & Turn* utilizados no levantamento TLS.



Fonte: produção do próprio autor.

Com os dados TLS, foi realizada a identificação dos troncos das árvores na parcela para posterior integração com a nuvem de pontos ALS, assim houve um maior número de dados para representação das árvores e possibilitará a modelagem tridimensional para a obtenção das variáveis dendrométricas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste primeiro capítulo, fez-se uma contextualização das tecnologias empregadas nesta pesquisa, com o estado da arte e as aplicações para a mensuração florestal.

Abordou-se também nas linhas iniciais o encaminhamento desta pesquisa, com caracterização da área de estudo e a coleta geral de dados. Nos capítulos seguintes será abordado, mais especificamente a utilização e processamento destes dados, para chegar aos resultados que atendam aos objetivos propostos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in *LASER* scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36 – 8/w2. Freiburg, 2004.

AXELSSON, P. DEM Generation From *LASER* Scanner Data Using Adaptive *TIN* Model. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vol. 33. Amsterdam, 2000.

BAGNATO, V. S.. Os fundamentos da luz *LASER*. **Física na Escola**, São Carlos, v. 2, n. 2, p. 4-9, out. 2001

BALTSAVIAS, E. P. Airborne *LASER Scanning*: existing systems and firms and other resources - **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 54, p. 164-198, 1999.

BORTOLOT, Z. J.; WYNNE, R. H., . Estimating forest biomass using small footprint *LIDAR* data: na individual tree-based approach that incorporates training data. **Journal of Photogrammetry e Remote Sensing**, v.59, 6, p. 342 – 360, 2005.

BRANDALIZE, M. C. B.; PHILIPS, J. W. Padrões de Classificação de Equipamentos *LASER* Utilizados em Levantamentos Terrestres e Aéreos. **Geodésia Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**, Florianópolis, v. 1, p. 1, 2002.

BIENERT, A.; MAAS, H.G.; SCHELLER, S. Analysis of the information content of terrestrial *LASER*scanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters.

In: **Workshop on 3D Remote Sensing in Forest**, 14-15. Vienna, 2006a.

BIENERT, A., SCHELLER, S., KEANE, E., MULLOOLY, G. AND MOHAN, F. Application of terrestrial *LASER* scanners for the determination of forest inventory parameters. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 36. 2006b.

BIENERT, A., *et al.* Tree detection and diameter estimations by analysis of Forest terrestrial laserscanner point clouds. **ISPRS Workshop on LASER Scanning 2007 and SilviLASER 2007**. Finland, 2007.

BIENERT, A.; HESS, C.; MAAS, H.-G.; OHEIMB, G. von. A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial *LASER* scanner data. **ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy**, 2014.

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.

BUCK, A. L. B ; SILVA, M.N. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; MARTINS NETO, R. P. . Um algoritmo para filtragem do tronco em nuvem de pontos *LASER* terrestre de árvores de *Pinus* spp.. **Boletim de Ciências Geodésicas** (Online), v. 20, p. 806-829, 2014.

CARROLL, J .M. **Fundamentos y Aplicaciones del LASER.** Barcelona, Marcombo Boixareu Editores, 1978.

COELHO, L., BRITO, J. N. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: UERJ, 2007.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema LASERscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. Curitiba, UFPR, 97p, 2004.

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**. 2011.

DRAKE, J. B. *et al.* Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint *LIDAR*. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, p. 305 – 319, 2002.

FRIEDLAENDER, H., KOCH, B. First experience in the application of *LASER scanner* data for the assessment of vertical and horizontal forest structures, **IAPRS, Vol. XXXIII**, Amsterdam, 2000.

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, oct. 2004.

GATZIOLIS, D.; POPESCU, S.; SHERIDAN, R.; KU, N. Evaluation of terrestrial *LIDAR* technology for the development of local tree volume equations. In: **SILVILASER 10°**. Freiburg. *Proceedings...* Freiburg, 2010.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. *LIDAR*: princípios e

aplicações florestais. **Pesquisas Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n63, p. 231-244, 2010.

GONÇALES, R.. **Dispositivo de varredura LASER 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007

GONÇALVES, S. S. O. **Classificação de ocupação do solo com base em dados LIDAR.** 2012. 120p. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do Território), Instituto Politécnico de Viana do Castelo. Portugal, 2012.

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

HYPPA, J.; INKINEN, M. DetectING and estimATING attributes for single trees using *LASER* scanner. **Photogrammetric Journal**. Finland, v. 16, p. 27 – 42, 1999.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Diretoria de Pesquisas – DPE – Coordenação de População e Indicadores Sociais – COPIS.** Doutor Pedrinho, SC. 2014.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos. 598 p. 2011.

KIRÁLY, G; BROLLY, G.. Volume calculations of single trees based on terrestrial *LASER* scanning. In: SILVILASER, 10º, 2010, Freiburg. **Proceedings...** Freiburg, 2010.

KOCH, B.; HEYDER, U.; WEINACKER, H. Detection of individual tree crowns in airborne *LIDAR* data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n° 4, p 357 – 363, 2006.

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.

KUMAR, V. **Forest inventory parameters and carbon mapping from airborne LIDAR**. Dissertação de mestrado apresentada a Faculdade de Ciências da Geo-informação e Observação da Terra da Universidade de Twente. feb. 2012.

LEICA SCANSTATION P30-P40 - USER MANUAL (2015). Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-ScanStation-P40-P30_106396.htm> Acesso em: 03 out. 2015.

LEICA ACESSÓRIOS - Tilt & Turn target. Disponível em: <http://hds.leicageosystems.com/en/Targets_19143.htm> Acesso em: 03 out. 2015.

LEONARDO DA VINCI, EDUCATION AND CULTURE. Theory and practice on Terrestrial *LASER* Scanning. **3D RiskMapping**, 2008. Disponível em: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/201130/2/leonardo_tutorial_final_vers5_english.pdf>. Acesso em 30 ago. 2015.

LIANG, X. *et al.* Plot-level trunk detection and reconstruction using one scan mode terrestrial *LASER* scanning data. **2008 International workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications**, IEEE, China, Beijing, 30 June–2 Jul, 2008.

LIANG, X.; LITKEY. P.; HYYPÄ, J.; KAARTINEN, H.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial *LASER* scanning. **Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, no. 2. P. 661 – 670, 2012.

LIANG, X.; HYYPÄ, J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial *LASER* scans at the feature and decision levels. **Sensors**, 13. p. 1614 – 1634, 2013.

LI, Y.; HESS, C.; WEHRDEN, H. von.; HÄRDTKE, W.; OHEIMB, G. von. Assessing tree dendrometrics in young regenerating plantations using terrestrial *LASER* scanning. **Annals of Forest Science**. France, 2014.

LIM, K. S., TREITZ, P., BALDWIN, K. E MORRISON, I., 2003. EstimATING above-ground biomass using *LIDAR* remote sensing. **Conference of the International Society of Photo Optical Instrumentation Engineers**, 7p, 2013.

LINGNAU, C.; NAKAJUMA, N.Y.; DAMAS, B.; SANDOS, D. S. dos.; VINHAL, L. A. Obtenção de parâmetros florestais através de *LASER* terrestre – Novas perspectivas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007.

LINGNAU, C.; MACHADO, A.M.L.; BAVARESCO JUNIOR, A.; COLLA, F. L. Determinação de diâmetros a diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados *LASER* terrestre. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009.

LINGNAU, C. *et al.* Modelagem do fuste em povoamentos de *Pinus taeda* a partir da varredura *LASER* terrestre. In: IX Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas

de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal, 2010, Curitiba. **Anais...** v. 1. p. 111-118, 2010.

MAAS, H.-G.; BIENERT, A., SCHELLER, S.; KEANE, E. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial *LASER* scanner data. **International Journal of remote sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579–1593, 2008.

MÁRQUEZ, A. **Un tratado sobre el escaner terrestre TLS**. Mecinca, 2010. Disponível em: . Acesso em: 06 set. 2015.

MARTINS NETO, R. P. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; BUCK, A. L. B ; SILVA, M.N. ; PESCK, V. A. . Modelagem da seção transversal de *Pinus taeda* L. por meio da varredura *LASER* terrestre. In: **X SenGeF –Anais...** p. 776-783, 2012.

MARTINS NETO, R. P.; BUCK, A. L. B.; SILVA, M. N.; LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; PESCK, V. A. Avaliação da varredura *LASER* terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n° 3, p. 420 – 433, jul – set, 2013a.

MARTINS NETO, R. P. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; BUCK, A. L. B ; SILVA, M.N. ; PESCK, V. A. . Terrestrial *LASER* scanning to obtain dendrometric variables in *Eucalyptus grandis* trees. In: **Latin-America Remote Sensing Week**, 2013, Santiago. E-Book LARS 2013, 2013b.

MARTINS NETO, R. P. ; CONTO, T. ; BUCK, A. L. B ; LINGNAU, C. ; PESCK, V. A. ; ZANON, M. L. B. . Proposta de um algoritmo para extração semiautomática do fuste em dados de varredura *LASER* terrestre e determinação do volume comercial. In: **Anais do 6 Simpósio Latino-**

Americano sobre Manejo Florestal, Santa Maria – RS, v. 6. p. 473-478, 2015.

NÆSSET, E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne *LASER scanner* data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, p. 49– 56, 1997.

NÆSSET, E. PredictING forest stand characteristics with airborne scanning *LASER* using practical two – stage procedure and field data. **Remote Sensing Environ**, v. 80, p. 88– 99, 2002.

OLIVEIRA, L. T de.; FERREIRA, M. Z.; CARVALHO, L. M. T de.; FERRAZ FILHO, A. C.; OLIVEIRA, T. C. A.; SILVEIRA, E. M. O.; ACERBI JUNIOR, F. W. Determining timber volume of eucalyptus stands by airborne *LASER* scanning. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.**, Brasília , v. 49, n. 9, p. 692-700, set. 2014a.

OLIVEIRA, L. T de.; CARVALHO, L. M. T de.; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T. C. A.; BATISTA, V. T. F. P. Influência da idade na contagem de *Eucalyptus* sp. com dados *LIDAR*. **CERNE**, Lavras , v. 20, n. 4, p. 557-565, Dec. 2014b.

OPTECH – Orion M-200 Airborne Lidar Summary Specification Sheet. Disponível em: <<http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/ORION-M-Specsheet-140624-WEB.pdf>> Acesso em: 08 nov. 2015.

PÁL, I. Measurements of forest inventory parameters on terrestrial *LASER* scanning data using digital geometry and topology. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. xxxvii – B3b. Beijing, 2008.

PEINHOPF, C. Determinação de variáveis dendrométricas de *Eucalyptus urograndis* com dados LIDAR aerotransportado. 2012. 55p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Estadual do Centro – Oeste, Irati, 2012.

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.

PUESCHEL, P.; NEWNHAM, G.; ROCK, G.; UDELHOVEN, T.; WERNER.; HILL, J. The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial LASER scans. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 77. 44–56, 2013.

RIBAS, R. P. Individualização de árvores em ambiente florestal nativo utilizando métodos de segmentação em modelos digitais produzidos a partir de tecnologia LIDAR. Dissertação de Pós – Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, 72p, 2011.

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.

SILVA, M.N. ; BUCK, A. L. B ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; MARTINS NETO, R. P. ; PESCK, V. A. . LASER Scanner Terrestre para medições florestais - Princípios e

Aplicações. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia (Online)**, v. 65, p. 1143-1152, 2013.

SIMONSE, M., ASCHOFF, T., SPIECKER, H., THIES, M., 2003: Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial *LASER scanning*. **Proceedings of the ScandLASER Scientific Workshop on Airborne LASER Scanning of Forests**, Umeå/Sweden,, p. 251- 257, 2013.

THIES, M.; SPIECKER, H. Evaluation and future prospects of terrestrial *LASER scanning* for standardized forest inventories. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. xxxvi – 8/w2. Freiburg, 2004.

VOSSELMAN, G. Slope Based Filtering of *LASER Altimetry Data*. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vol.33, Part B3, Amsterdam, 2000.

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

WATT, P. J.; DONOGHUE, D. N. M.; DUNFORD, R. W. Forest parameter extraction using terrestrial *LASER scanning*. **International Journal of Remote Sensing** 26: 1437 – 1446, 2003.

WEZYK, P., KOZIOL, K., GLISTA, M., PIERZCHALSKI, M. Terrestrial *LASER scanning* versus traditional forest inventory first results from the polish forests. **ISPRS Workshop on LASER Scanning 2007 and SilviLASER 2007**, Espoo, September 12-14, Finland, pp. 424-42, 2007.

WEZYK, P. The integration of the terrestrial and airborne laser scanning Technologies in the semi – automated process of retrieving selected trees and forest stand parameters. **Ambiência**, Guarapuava, v. 8, Ed. Especial, p. 531 – 546, 2012.

WUTKE, J. D.. **Métodos para avaliação de um sistema LASER scanner terrestre**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ZANDONÁ, D. F. **Potencial uso de dados provenientes de LASER scanner aerotransportado para extração de variáveis dendrométricas**. 2006. 92p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Varredura a *LASER* aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Forestalis (IPEF)**, v. 36, p. 295-306, 2008.

ZONETE, M. F. **Análise do uso da tecnologia LASER aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus* sp no sul da Bahia**. 2009. 98p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP/ESALQ, Piracicaba, 2009.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO ALTIMÉTRICA DOS MODELOS DIGITAIS DO TERRENO GERADOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE FILTRAGEM DA NUVEM DE PONTOS ALS

RESUMO

Os métodos de filtragem são importantes para a classificação dos pontos na nuvem ALS em pontos de solo e pontos pertencentes à vegetação. Assim é possível a produção de modelos digitais como o MDT e MDS. Este capítulo teve como objetivo comparar diferentes métodos de filtragens (Kraus & Pfeifer, *ATIN* e Morfológico de Chen) em relação a um modelo paramétrico obtido com a estação total, em um talhão de *Pinus taeda* com 16 anos de idade sem tratos silviculturais, para verificar a precisão dos modelos gerados. Ao todo foram coletados 200 pontos com a estação total. A avaliação foi realizada por meio de análise visual, análise de curvas de nível com equidistância de 0,50 m e estatística dos resíduos. Como resultados, todos os filtros superestimaram os valores de cota mais baixos e homogeneizaram áreas com pequenas elevações. O filtro *ATIN* e o filtro de Kraus & Pfeifer obtiveram 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 por este filtro foi o mais indicado para as outras fases do processamento de dados ALS na obtenção de variáveis dendrométricas.

Palavras-chave: LiDAR, plantios florestais, topografia, estação total.

CHAPTER 2

ALTIMETRY EVALUATION OF DIGITAL TERRAIN MODELS GENERATED BY DIFFERENT FILTERING METHODS IN ALS POINTS CLOUD

ABSTRACT

Filtering methods are important for ALS point cloud classification in terrain points and vegetation points. So it's possible to produce digital models like DTM and DSM. This chapter aimed to compare different filtering methods (Kraus & Pfeifer, *ATIN* and Chen's Morphological) in relation to a parametric model obtained with total station, in 16 years old *Pinus taeda* without silvicultural treatments, to check the accuracy of the generated models. The evaluation was performed by visual analysis, contour lines of 0.50 m equidistant and statistical analysis of error. As a result, all the filters overestimate the lowest height values and homogenized areas with lowest elevations. The *ATIN* and Kraus & Pfeifer filters had a similar performance as the minimum and maximum height values, as well as the errors, however the *ATIN* filter presented contour lines with lower noises. The DTM derived by this method was the most suitable for the other steps of ALS processing data to obtaining dendrometric variables.

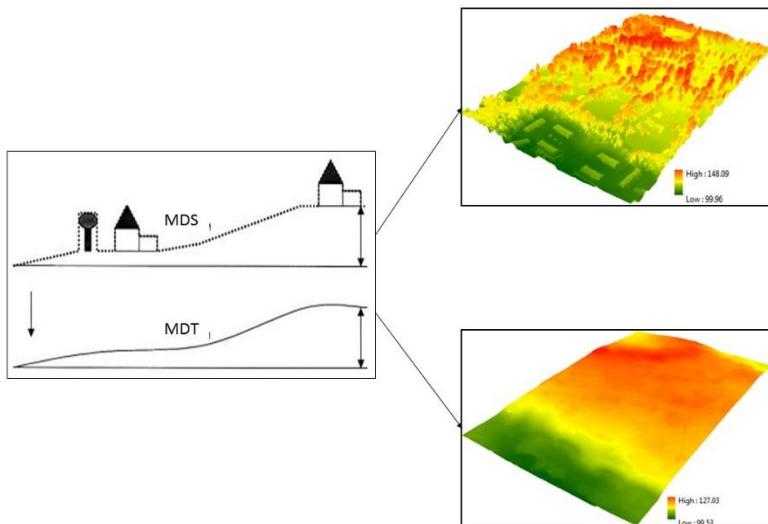
Keywords: LiDAR, forest plantations, topography, total station.

1 INTRODUÇÃO

Os dados ALS são utilizados principalmente para a geração de modelos digitais, os quais possuem uma alta precisão devido à quantidade de pontos *LASER* que chegam ao solo. Os modelos digitais podem ser separados em MDS (Modelo Digital de Superfície) e MDT (Modelo Digital do Terreno).

O MDS representa todas as estruturas presentes na superfície do terreno (como árvores, edificações, entre outros) (ELBERINK & MAAS, 2000; ZANDONÁ, 2006). Ainda poder ser definido como um modelo digital de elevação (MDE) que representa as formas das feições das superfícies terrestre (ZHAO *et al.*, 2005; BANDARA *et al.*, 2011; PEREIRA, 2014). Já o MDT é a representação aproximada do relevo com os rios, afloramentos de rochas, picos e depressões, ou seja, apenas o solo nu sem qualquer estrutura presente em sua superfície, sendo muito utilizado em controle de risco de inundação, planejamento de infraestrutura, análise de fluxo de águas, tarefas de visualização entre outros (BRIESE *et al.*, 2007; PEREIRA, 2014; ZANDONÁ, 2006). A representação do MDS e do MDT pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo das superfícies geradas no MDS e MDT.



Fonte: Elberink & Maas, 2000; Pereira, 2014.

Os modelos digitais são de suma importância para o posterior processamento e extração de informações da nuvem de pontos, focando na área florestal, eles serviram para a identificação das copas das árvores e determinação da altura, que são dados de entrada nos modelos de regressão para determinação das outras variáveis dendrométricas como diâmetro e volume.

A acurácia dos MDT gerados a partir da nuvem de pontos ALS influenciará na precisão da extração das informações e está fortemente atrelado ao método de filtragem utilizado, que é a classificação entre os pontos pertencentes e os não-pertencentes ao terreno. No caso de estudos envolvendo a vegetação, há uma dificuldade em classificar os pontos que pertencem ao solo devido à densidade das copas que dificulta a penetração dos pulsos no terreno (ZANDONÁ, 2006; PEREIRA, 2014).

Muitos estudos fixam-se nos métodos de filtragem da nuvem de pontos para classificar pontos pertencentes ao solo,

aos pertencentes a vegetação e posteriormente geração de modelos digitais (KRAUS & PFEIFER, 1998; VOSSELMAN, 2000; AXESSELSON, 2000), porém poucos destes estudos são focados em florestas detalhando o processo da filtragem.

Kraus & Pfeifer (1998) desenvolveram um filtro, baseado em predição linear com uma precisão individual para cada medida, para criação do modelo digital do terreno em áreas florestais. Os resultados indicaram uma precisão de 25 cm em terrenos planos, porém com contornos pobres em detalhamentos geomorfológicos devido à densidade grosseira de pontos/m² dos equipamentos *LASER* existentes na época. Também concluíram que por meio da filtragem e interpolação dos pontos é possível a classificação automática dos pontos *LASER* de terreno e de vegetação, para uma taxa de penetração dos pulsos na vegetação de 25% os resultados se mostraram promissores neste estudo. Uma taxa menor de penetração dos pulsos na vegetação prejudica diretamente na qualidade do MDT.

Em áreas montanhosas com florestas nativas na Áustria, Wagner *et al.* (2004) testaram um filtro hierárquico para separar os pontos do solo dos pontos de vegetação e criação do MDT. O filtro funciona em quatro diferentes etapas: *thin out*, interpolação, filtragem e classificação em que algumas regras e número de interações são pré-definidos. Primeiramente, o algoritmo estabelece um *grid* na nuvem de pontos onde o ponto mais baixo é definido. Depois é interpolado o MDT sem a diferenciação dos pontos, posteriormente são atribuídos pesos aos pontos baseado em sua probabilidade em pertencer ou não ao terreno. Por fim, serão classificados somente os pontos que estão em um determinado limiar do MDT calculado anteriormente. Em áreas livres de cobertura florestal, a precisão foi em média de 0,3 m, todavia em áreas com floresta, principalmente nos declives, a precisão foi de 15 m. Os autores relatam da dificuldade dos pulsos *LASER* em penetrar em áreas de florestas densas, principalmente devido a condição do relevo naquela região.

Utilizando o filtro *Adaptive TIN*, Pereira, (2014) em áreas de campo e vegetação rasteira com árvores de *Araucaria angustifolia* classificou corretamente 89% dos pontos entre solo e vegetação. Os erros estão atrelados à vegetação rasteira que o algoritmo de filtragem não consegue classificar.

As pesquisas nesta área carecem de informações quanto à precisão dos modelos digitais gerados, principalmente porque não há comparação com os métodos de topografia convencional dificultando a tomada de decisão quanto ao melhor filtro a ser utilizado para determinada situação.

Com base no exposto acima, este capítulo teve como objetivo além de testar diferentes filtros para classificar os pontos de solo e da vegetação em dados ALS, comparar os modelos digitais de terreno gerados com o método direto obtido pela estação total.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 COLETA DE DADOS EM CAMPO

No talhão florestal no qual foi implantada a parcela, foram coletados 200 pontos com a estação total, com os quais foi produzido um MDT que serviu como parâmetro de comparação para as filtragens na nuvem de pontos. O método utilizado foi o de poligonal aberta apoiada por dois pontos de controle, em que foi necessário em um primeiro momento dois pontos com coordenadas conhecidas fora do talhão, para depois realizar o transporte de coordenadas e coletar os pontos dentro do talhão.

Para a determinação das coordenadas dos pontos de apoio, utilizou-se um par de receptores de sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de dupla frequência (L1/L2) modelo GS 15, fabricados pela *Leica Geosystems*. Em um dos pontos foi determinada a base, onde o GPS ficou estático durante aproximadamente 2 horas. Devido ao mau tempo no momento

da coleta, foi colocada uma capa plástica com intuito de proteger o equipamento. Este ponto base foi utilizado para determinar as coordenadas de um ponto amarrado ao referencial terrestre, para posterior transporte de coordenadas e coleta com a estação dentro do talhão (Figura 2).

Figura 2 – Base do sistema GNSS.



Fonte: produção do próprio autor.

O outro receptor GNSS era uma estação móvel. Com a base foi realizado o transporte de coordenadas e com ela foi processado o ponto móvel. Estes dois pontos são necessários para georreferenciar a parte do levantamento topográfico. Com as coordenadas conhecidas, a da base e o do ponto móvel, a estação foi instalada em um dos pontos e zerada no outro ponto,

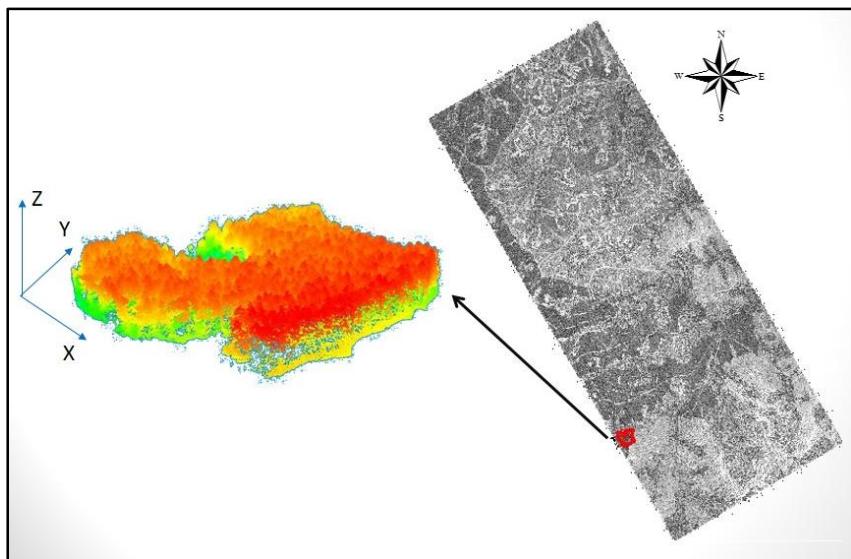
então foram realizadas as medições dos pontos no interior do talhão com o método de caminhamento poligonal e irradiações, visto que no interior do talhão não seria possível a coleta com GNSS.

Os dados GNSS foram processados no *software* LEICA GEOFFICE e o transporte de coordenadas realizado no aplicativo Posição. As estações de referência pertencente a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) utilizadas foram de Araquari e Curitiba.

2.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS ALS

Primeiramente, foi realizado um recorte na nuvem de pontos ALS baseado em um arquivo vetorial para obter somente a área de interesse (talhão referente aos 16 anos de idade), diminuindo assim o volume de dados e agilizando o tempo de processamento (Figura 3).

Figura 3 – Imagem de intensidade da nuvem de pontos ALS mostrando o recorte para a área referente ao talhão de 16 anos de idade.



Fonte: produção do próprio autor.

A partir deste recorte, iniciou a etapa de processamento testando os diferentes filtros para a classificação dos pontos e posterior geração do MDT.

2.2.1 Filtragem

Foram testados 3 filtros, a saber: filtro de Kraus & Pfeifer (1998) disponível no *software* FUSION/LDV; *Adaptive TIN* (AXELSSON, 2000) disponível do *software* LasTools; e baseado em métodos morfológicos (CHEN *et al.*, 2007a; CHEN *et al.*, 2007b) disponível no pacote TIFFS (*A Toolbox for Lidar Data Filtering and Forest Studies*).

2.2.1.1 Filtro de Kraus & Pfeifer

O filtro desenvolvido por Kraus & Pfeifer (1998) é do tipo interpolador, ou seja, por meio de diversas interações o algoritmo utiliza interpolação linear ponderada por meio de mínimos quadrados para encontrar os pontos pertencentes ao terreno. Geralmente, os pertencentes ao terreno possuem resíduos negativos, e os que não pertencem ao terreno resíduo positivo, com isso uma função de peso foi projetada para atribuir um elevado peso para os pontos de resíduo negativo (Chen *et al.*, 2007b).

O filtro citado acima, funciona através de um processo interativo baseado na predição linear e na avaliação da precisão a nível local, sendo que na primeira fase um *grid* é calculado baseado na média dos retornos sem a diferenciação dos mesmos. Como é uma superfície média, o algoritmo divide a nuvem de pontos em duas partes, as que estiverem acima desta superfície são descartadas, pois não fazem parte do solo. Com isso, uma nova superfície é construída, em que todos os pontos acima desta nova referência são descartados, e os pontos abaixo receberão diferentes pesos de acordo com a distância. Quanto mais baixo o ponto, maior será o peso do ponto na criação desta nova superfície de referência. (KRAUS & PFEIFER, 1998; GORGENS *et al.*, 2014). O algoritmo pode ser resumido pela Equação 1:

$$\rho = \begin{cases} \frac{1}{1 + (a * (v_i - g^b))} & v_i \leq g \\ 0 & g < v_i \leq g + w \\ 0 & g + w < v_i \end{cases} \quad \text{eq. 1}$$

A primeira etapa consiste na criação desta superfície, que considera o valor médio dos pontos dentro de uma determinada janela. Para cada ponto, é calculado o desvio dele em relação à superfície (v_i). Os pontos cujo o desvio em relação à superfície

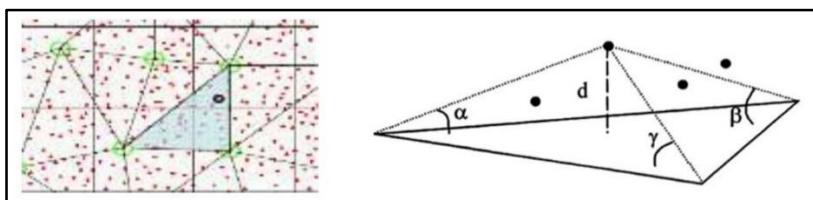
de referência forem maiores que o limiar g acrescidos da tolerância w são eliminados. Quando os desvios dos pontos estejam entre o limiar g e da tolerância $g + w$ recebem pesos proporcionais à distância do limiar. Esta proporcionalidade é definida por uma função sigmóide de parâmetros a e b . Os pontos cujos desvios sejam inferiores ao limiar recebem peso máximo (no caso 1). Por fim, uma nova superfície é calculada considerando os pesos e os pontos que permaneceram. O procedimento é repetido de acordo com o estabelecido pelo usuário (KRAUS & PFEIFER, 1998; GORGENS *et al.*, 2014).

2.2.1.2 Filtro *Adaptive TIN*

O método de filtragem proposto por Axelsson (2000) é baseado no adensamento progressivo de uma *TIN* (Rede Triangular Irregular) inicial, gerada a partir dos pontos distribuídos. O método é dividido em: Cálculo dos parâmetros de inicialização do método usando toda a nuvem de pontos ALS; Seleção dos pontos sementes; Adensamento progressivo da *TIN* gerada a partir dos pontos sementes (DAL POZ, 2013).

Denominado de *Adaptive TIN* (*ATIN*), o filtro utiliza a distância de um ponto sobre a superfície de uma *TIN* para selecionar os pontos pertencentes ao solo. Este filtro irá selecionar alguns pontos mais baixos que pertencem ao terreno, então os mesmos são triangulados para produzir a *TIN*. A principal vantagem deste filtro está em sua capacidade de lidar com superfícies descontínuas. Em cada interação os pontos são testados, e caso estejam abaixo do limiar pré-estabelecido que são os pontos de ângulo e a distância que formam as faces da rede, são adicionados a *TIN* (Figura 4).

Figura 4 – Seleção de pontos do filtro *ATIN* baseado nos ângulos e distância.



Fonte: adaptado de Sulaiman *et al.*, 2010 e Axelsson, 2000.

Para cada ponto a ser avaliado são calculados três ângulos conforme figura acima (α , β , γ) entre a face da *TIN* e as três direções ligando os vértices da face triangular e o ponto a ser avaliado, e a distância “ d ” entre o ponto a ser avaliado e a face triangular. O ponto em questão é considerado como pertencente ao terreno caso a distância d for menor que o limiar de distância e os ângulos forem menores que o limiar angular. Este procedimento é aplicado a todos os pontos da nuvem, e depois, os limiares angular e de distância são estimados novamente, porém agora somente com base nos pontos classificados como do terreno. Um novo *TIN* é gerado com todos os pontos classificados como pertencentes ao terreno e os pontos não classificados anteriormente são submetidos novamente a um novo ciclo de filtragem. Estas interações são repetidas até que não exista mais nenhum ponto que possa ser classificado como pertencente ao terreno (AXELSSON, 2000; DAL POZ, 2013; PEREIRA, 2014).

2.2.1.3 Filtro Morfológico

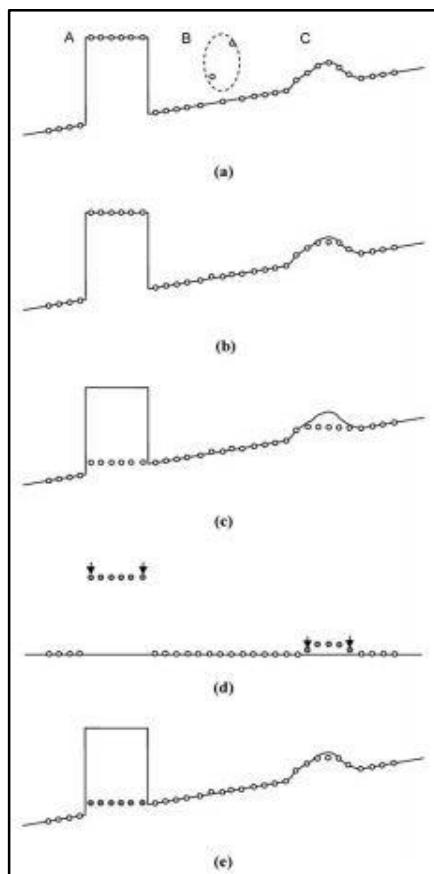
A ideia dos métodos morfológicos, é a aproximação da superfície do terreno utilizando operações de abertura (dilatação) e fechamento (erosão). Em comparação com os outros métodos, estes são conceitualmente mais simples e

podem ser facilmente implementados. Quando existe um número suficiente de pulsos que atinge o solo, a abertura morfológica com uma janela de pequeno tamanho pode remover com eficiência os objetos da superfície e gerar uma superfície próxima ao terreno. No entanto, quando não há muitos pulsos que atingem o solo, e sim as estruturas presentes nele, o tamanho da janela para a abertura morfológica deve ser maior, produzindo uma superfície com características de terreno mais salientes. Portanto, a maneira de manter inalteradas as características do terreno ao usar janelas de grandes aberturas é um desafio (CHEN *et al.*, 2007).

Dado o contexto acima, o filtro desenvolvido por Chen *et al.*, (2007) e Chen (2007) é do tipo morfológico onde, primeiramente, o preenchimento dos dados ausentes no conjunto de dados utilizados é realizado por meio da criação de um *grid*. Depois desta etapa os objetos acima da superfície são removidos por aberturas morfológicas com o aumento progressivo do tamanho das janelas. Áreas com vegetação normalmente exigem tamanhos de janela menores do que áreas construídas, desde que os pulsos *LASER* possam penetrar o dossel e atingir o solo. Após uma abertura de janela morfológica mínima, as árvores foram removidas da superfície, assim como grandes objetos remanescentes como, por exemplo edificações. Um problema comum neste conjunto de dados é a existência de *outliers*, que possuem valores extremamente altos ou baixos quando comparados ao terreno em volta. Estes valores extremos mais elevados podem ser removidos da superfície pela abertura morfológica, enquanto os valores extremos mais baixos não, portanto, é desenvolvido um método para detectar os valores extremos mais baixos e preencher a superfície. Removidas a vegetação e os pontos extremos, o próximo passo é remover grandes objetos artificiais como edifícios. Isto é realizado com o uso de janelas maiores para remover estes pontos, evitando cortes drásticos nas características do terreno. Por fim, os pontos do terreno são extraídos da superfície aproximada e um MDT é

gerado conforme a Figura 5, onde (a) pontos medidos; (b) pontos cujas elevações são atualizadas abrindo uma janela de pequena abertura; (c) pontos cujas elevações são atualizadas utilizando uma janela de grande abertura; (d) a diferença entre a nuvem de pontos originada pela janela de pequena abertura e de grande abertura; (e) nuvem de pontos após uma interação (pontos evidenciados).

Figura 5 – Exemplificação do filtro morfológico desenvolvido por Chen *et al.* (2007a).



Fonte: Chen *et al.*, (2007a).

2.2.2 Interpolação para criação do MDT e Comparação

Antes de gerar o MDT é preciso modelar os dados como uma superfície contínua, a partir de pontos discretos. Por isso torna-se necessário interpolar os dados a partir de pontos conhecidos para obter as informações para os pontos intermediários. A escolha correta do método de interpolação é fundamental, pois esta definirá a qualidade e precisão do modelo esperado (YANG *et al.*, 2004).

Neste estudo optou-se em utilizar o interpolador Inverso da Distância à Potência (IDW), pois para a modelagem de terreno através de dados *LIDAR*, estudos anteriores recomendam o emprego de técnicas de interpolação exatas, como Krigagem, Spline e IDW, uma vez que estas preservam os dados originais (ZANDONÁ *et al.*, 2005; TEIXEIRA, 2011; PEREIRA, 2014).

O IDW (Equação 2) é um interpolador de média ponderada em que o valor do ponto desconhecido é uma soma ponderada dos valores de N pontos conhecidos. Para isso, atribui-se aos dados uma potência de ponderação, sendo a de segundo grau é a mais utilizada (SILVA, 2011). Esta potência controla a forma como a distância da malha de pontos se distribui. Quanto maior o grau de potenciação, menor o efeito dos pontos mais afastados da malha na interpolação, já para uma potência menor, os pesos são mais uniformemente distribuídos pelos pontos de dados vizinhos (YANG *et al.*, 2004).

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad \text{eq. 2}$$

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 3):

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i^n} \quad \text{eq. 3}$$

Onde:

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

A interpolação foi utilizada tanto para os dados oriundos da estação total como para os oriundos dos diferentes métodos de filtragem, e optou-se por utilizar o mesmo método para fins de comparação e não mascarar os resultados obtidos;

Após a etapa de interpolação foi gerado um arquivo *raster*, com o qual foi possível criar a superfície do modelo digital do terreno. Foi feita também a extração das curvas de nível, com equidistância de 0,50 m, dos modelos digitais criados que serviram de intuito para uma análise visual para avaliar a qualidade da filtragem.

Por meio da ferramenta *Raster Calculator* presente no software ArcGis 10.2.1, foi realizada a subtração entre o MDT direto (obtido pela estação total) e o gerado por meio dos diferentes métodos de filtragem para verificar a precisão dos modelos por meio do resíduo (erro), e resíduo em porcentagem de acordo com a equação 4 e equação 5.

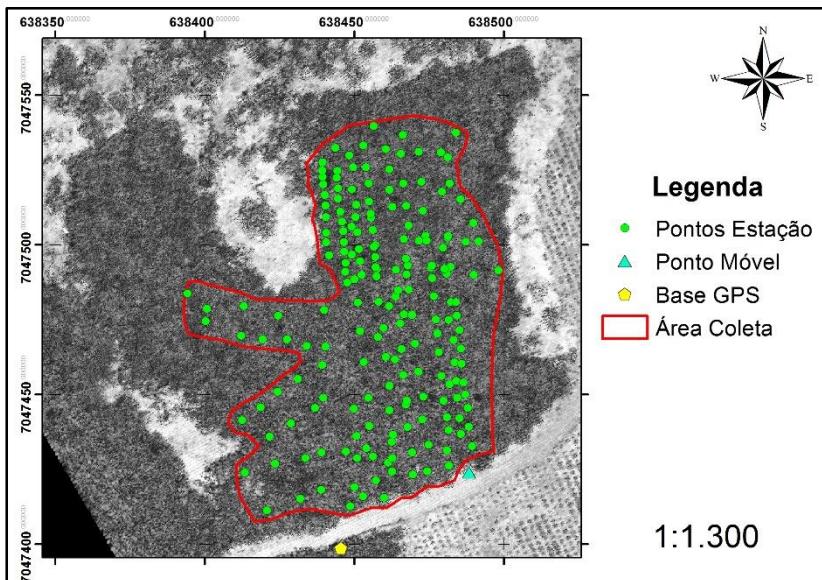
$$e = MDT_{direto} - MDT_{obesrvado} \quad \text{eq. 4}$$

$$e\% = \frac{MDT_{direto} - MDT_{obesrvado}}{MDT_{direto}} \times 100 \quad \text{eq. 5}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A distribuição dos pontos coletados com estação total no talhão de 16 anos onde foi conduzido o estudo, pode ser visto na Figura 6. Foram coletados ao todo 200 pontos de maneira aleatória com a estação total.

Figura 6 – Imagem de intensidade com a localização dos pontos levantados com estação total.

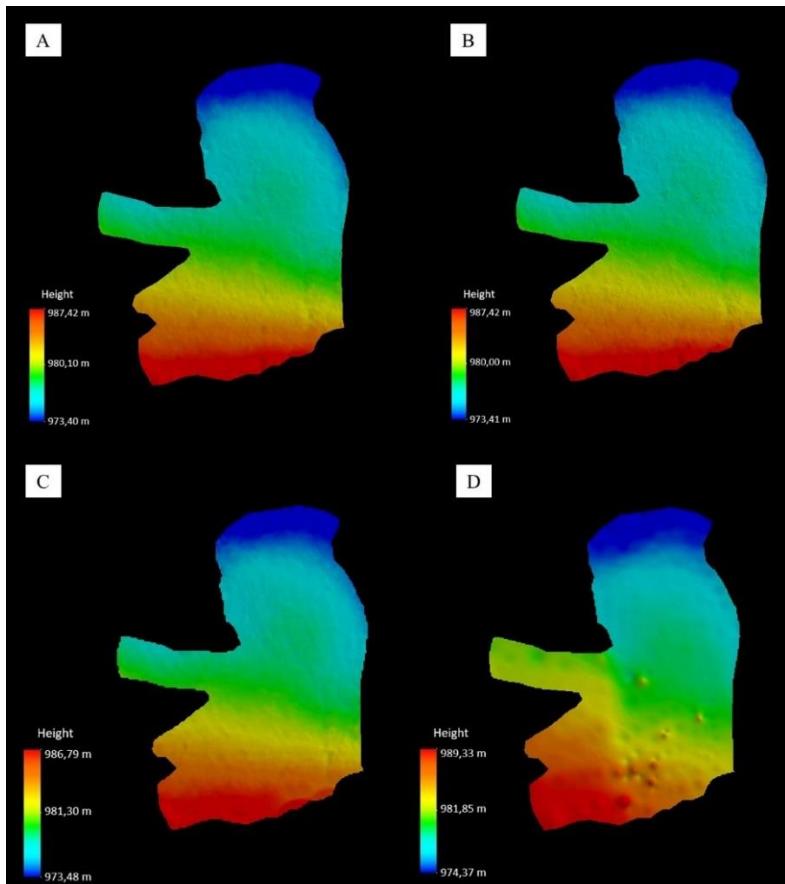


Fonte: produção do próprio autor.

Para fins de comparação, foi realizado um recorte baseado em um arquivo vetorial somente na área que continha os pontos da estação total, para que não houvesse sub ou superestimativas na geração do MDT pela ausência de dados em algumas áreas. Este mesmo recorte foi usado nos modelos gerados com os diferentes filtros testados. Os resultados dos MDTs podem ser vistos na Figura 7, e suas estatísticas

(contendo a cota mínima, média, máxima e diferença entre as cotas máxima e mínima) na Tabela 1.

Figura 7 – Modelos Digitais do Terreno gerados pelos diferentes métodos de filtragens para dados ALS e pela estação total. A) Filtro de Kraus & Pfeifer (1998); B) Filtro ATIN; C) Filtro Morfológico de Chen *et al*, (2007). D) Modelo paramétrico obtido por meio da Estação Total.



Fonte: produção do próprio autor.

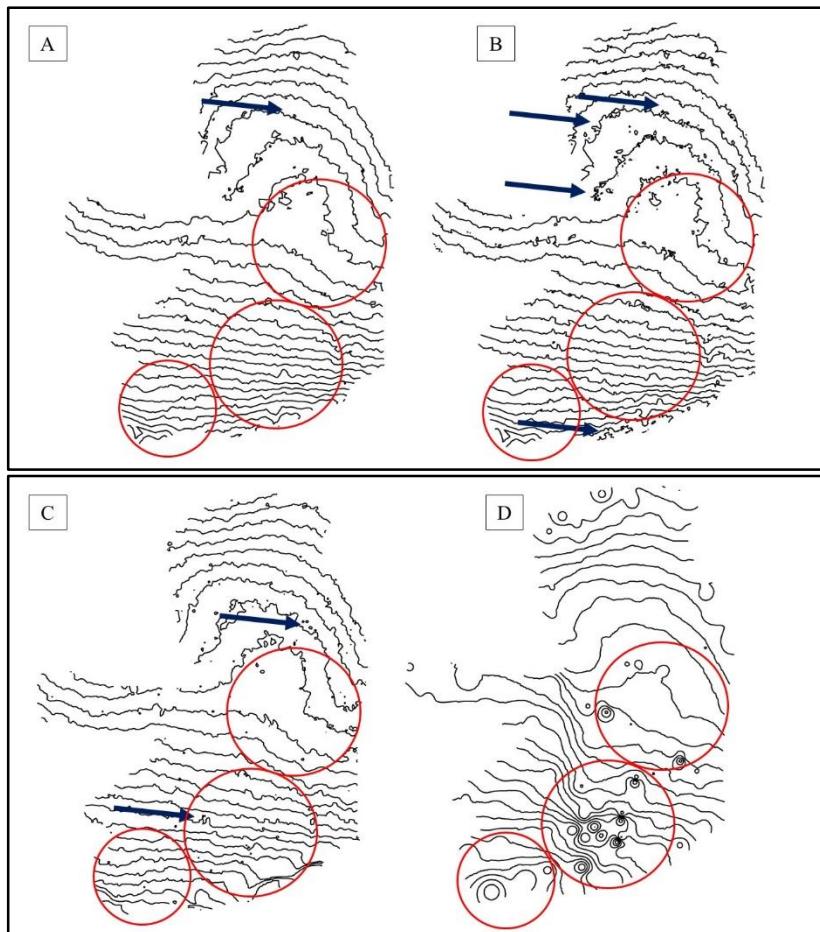
Tabela 1 – Estatísticas dos MDTs.

Filtro	Cota Max (m)	Cota Média (m)	Cota Min (m)	Diferença (m)
Kraus & Pfeifer	987,42	980,41	973,40	14,02
<i>ATIN</i>	987,42	980,42	973,41	14,01
Morfológico	986,79	980,14	973,48	13,31
Estação Total	989,33	981,85	974,37	14,96

Fonte: produção do próprio autor.

Avaliando as curvas de nível na Figura 8, é possível observar que o filtro *ATIN* foi o mais eficiente, com menores ruídos de objetos remanescentes, já o filtro de Kraus & Pfeifer foi o que obteve o maior número de objetos remanescentes e o Morfológico de Chen obteve um comportamento intermediário entre o filtro *ATIN* e o de Kraus & Pfeifer. Estes objetos estão evidenciados pelas setas azuis. Comparando com as curvas de nível obtidas pela estação total, todos os filtros homogeneizaram algumas áreas com pequenas elevações, as quais não foram detectadas durante o processo de filtragem. Essas áreas podem ser vistas nos círculos vermelhos.

Figura 8 – Comparação entre as curvas de nível nos diferentes MDT. A) Filtro de Kraus & Pfeifer (1998); B) Filtro ATIN; C) Filtro Morfológico de Chen *et al.* (2007). D) Modelo paramétrico obtido por meio da Estação Total.

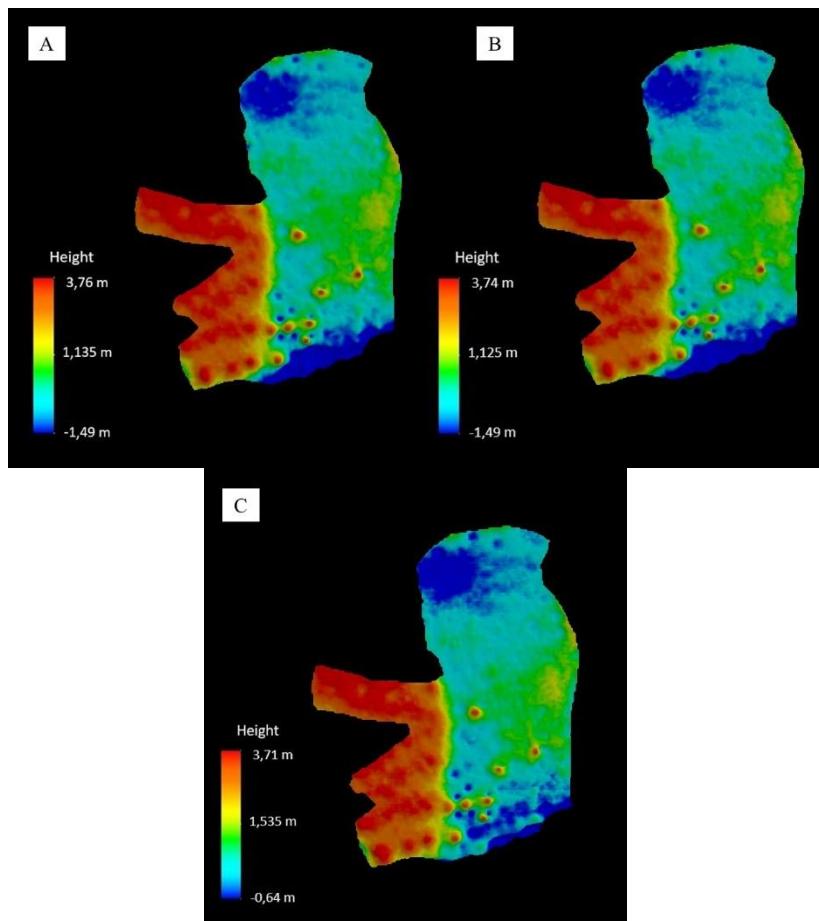


Fonte: produção do próprio autor.

Com base nas estatísticas e a análise visual dos MDT e das curvas de nível, os filtros de Kraus & Pfeifer e *ATIN* se comportaram de maneira muito similar ao classificar os pontos pertencentes dos não pertencentes ao solo, com cotas máximas, médias e mínimas muito próximas, porém na análise das curvas de nível, o filtro *ATIN* se mostrou superior com menor presença de ruídos, ou seja, de alguns pontos remanescentes de vegetação que não foram filtrados corretamente, resultado este corroborado por Pereira *et al.* (2014).

Já o filtro morfológico apresentou menor valor de cota máxima quando comparado com os outros dois filtros e menor diferença entre o valor máximo e mínimo de cotas (13,31 m) e por meio da análise das curvas de nível, apresentou alguns pontos de ruídos, porém menos que o filtro de Kraus e Pfeifer . O MDT gerado a partir da estação total, aqui usado como verdade de campo, foi o que gerou os maiores valores de cota máxima e mínima, consequentemente maior diferença entre estes valores quando comparado com os outros filtros. A comparação entre os diferentes métodos de filtragem com o valor paramétrico obtido pela estação total utilizando a ferramenta *Raster Calculator* está apresentado na Figura 9.

Figura 9 –Diferença entre o MDT filtrado e Estação Total A) Diferença para o filtro de Kraus & Pfeifer; B) Diferença para o filtro *ATIN*; C) Diferença para o filtro morfológico de Chen.



Fonte: produção do próprio autor.

As diferenças máximas, comparando com o MDT oriundo da estação total, estiveram na ordem de 3,7 m para todos os filtros testados e os erros mínimos variaram entre -0,64 m (Morfológico de Chen) e -1,49 m (Kraus & Pfeifer e *ATIN*)

corroborando o comportamento similar que estes dois filtros tiveram no momento da filtragem, ou seja, todos os algoritmos testados superestimaram as cotas nas áreas mais baixas.

É possível notar um erro sistemático (em vermelho) na parte esquerda da figura, e ocorreram devido a maior presença do sub-bosque e de vegetação arbustiva na área. Consequentemente, havia menos pontos, tanto *LASER* como de estação total, que representassem o terreno nesta região.

Em porcentagem, os erros médios foram 0,12% para o filtro de Kraus & Pfeifer e *ATIN* e 0,16 % para o filtro morfológico de Chen. Com isso, para a extração dos modelos digitais de superfície e modelos digitais de superfície normalizada (ou de copa) que serão necessários para identificação e isolamento das árvores e determinação de variáveis dendrométricas, recomenda-se o uso do filtro *ATIN*, não só pelo menor valor dos resíduos como também na menor presença de ruídos.

O filtro morfológico, devido ao seu caráter de dilatação e erosão, nas áreas com vegetação normalmente exige tamanhos de janela menores do que áreas construídas, desde que os pulsos *LASER* possam penetrar o dossel e atingir o solo. Foi possível notar, por meio da análise visual da nuvem de pontos, que em algumas áreas não possuíam pontos *LASER*, o que dificultou o processo de filtragem e consequentemente aumentou os erros por este método.

Existem na literatura poucos estudos comparando a precisão dos modelos digitais com valores paramétricos obtido por topografia. Zandoná *et al.*, (2005) testou a precisão dos modelos gerados em um fragmento denso de Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucárias). A densidade de pontos do levantamento ALS foi de 5 ponto/m², e o levantamento em campo foi realizado com metodologia muito similar ao deste estudo, em que foram implantados dezesseis pontos de apoio sendo que os dois primeiros e os dois últimos correspondentes a pontos de apoio GPS, ou seja, com coordenadas conhecidas.

Seguiu-se a metodologia da poligonal enquadrada para o transporte de coordenadas para o interior da floresta, utilizando estação total. Esta poligonal, por sua vez, cruza a floresta, abrangendo uma área considerável de estudo, com precisão de 0,0003 m na planimetria e 0,047m na altimetria. Na área adjacente à poligonal foram irradiados diversos pontos no terreno, para que fosse possível a geração de um modelo de terreno topográfico, para fins de comparação com o modelo obtido via mapeamento digital a *LASER*. A classificação dos pontos *LASER* entre pertencentes e não pertencentes ao terreno foi realizada por meio do filtro *ATIN* presente no *software TerraScan* e a interpolação foi realizada utilizando o inverso da distância a potência. A variação da altitude na área foi de 883 a 922 m. Comparando os modelos digitais, a precisão variou de -0,88 à 1 m, sendo que os valores maiores de erro foram encontrados em locais onde a malha de pontos gerada pelo levantamento topográfico não foi densa o suficiente. Em alguns locais, em função da grande quantidade de serrapilheira e vegetação rasteira, houve dificuldade de se determinar em campo, o que seriam pontos de terreno.

Em floresta natural boreal alpina no sul da Noruega com uma densidade de 97 árvores/ha, Næsset, (2015) testou a precisão dos modelos digitais de terreno oriundos de dados ALS. Foram pré-determinados 40 pontos amostrais espaçados de 50 m dentro de uma área retangular de 200 x 600 m. Estes pontos foram destinados para posterior sub – amostragem de pontos de controle no terreno para a geração de um MDT mais detalhado. Para a coleta dos dados, foi utilizado um posicionamento em tempo real com GPS RTK, e o transporte de coordenadas com dois receptores dupla frequência. A estação de base foi estabelecida utilizando um marco pré-determinado. Para cada um dos 40 pontos de amostragem que foram identificados em campo, foi estabelecido 10 pontos de controle adicionais no terreno. Neste caso, não se utilizou estação total, e sim o GPS de dupla frequência para a determinação de todos os pontos no

terreno. Ao todo foram adquiridos 426 pontos, sendo que foram registradas três variáveis em pontos a saber: forma do terreno (plano, côncavo e convexo); superfície do terreno (solo exposto, líquens e vegetação verde) e altura da vegetação (menor que 10 cm, entre 10 e 20 cm e maior que 20 cm). A aquisição dos dados ALS foi realizada em quatro diferentes ocasiões variando as frequências, altitudes de voo e a densidade de pulsos (ficando na média de 9 pontos/m²). A filtragem dos pontos foi realizada no software *TerraScan* por meio do algoritmo *ATIN*, e a interpolação dos pontos tanto os obtidos em campo quanto pelos dados *LIDAR* foi realizada utilizando a rede triangular irregular (TIN). Este estudo demonstrou um desvio padrão nos modelos digitais do terreno de 0,15 m em áreas com baixa densidade de vegetação. Os terrenos côncavos possuem uma tendência positiva e as superfícies convexas tendências negativas. O autor verificou que a diferença média entre as duas formas extremas do terreno em relação ao controle de solo foi de 0,108 m. Também foi verificado que o modelo digital do terreno gerado pela filtragem dos dados ALS estava deslocado 0,081 m do modelo paramétrico, cujo erro está atrelado a presença de vegetação que cobria os pontos do solo, ou seja, em locais com vegetação mais densa é esperada uma maior incerteza na superfície do terreno modelado.

Ambos os estudos citados chegaram a uma boa precisão comparando os modelos digitais oriundos pela filtragem dos dados ALS utilizando o filtro *ATIN* em comparação com dados obtidos por meio de levantamento em campo. Neste estudo, a precisão foi menor que à obtida aos outros estudos e pode se atrelar a alta densidade da floresta (aproximadamente 1.200 arv.ha⁻¹) o que dificulta a penetração dos pulsos *LASER* no terreno, dificultando a classificação dos pontos pertencentes e não pertencentes ao solo. A falta de tratos silviculturais também faz com que as árvores tenham uma maior galhada e maior densidade enquanto que no estudo de Zandoná *et al.*, (2005) e Næsset, (2015) as florestas nativas possuem densidade variável

e com a presença de clareiras o que permite uma maior penetração dos pulsos no interior da floresta.

Foi observado também neste estudo um deslocamento para baixo dos pontos de cota mínima comparado ao modelo digital paramétrico, como citado por Næsset, (2015) na ordem de 0,97 m para o filtro de Kraus & Pfeifer (1998) e ATIN e 0,89 m para o morfológico de Chen *et al.*, (2007).

4 CONCLUSÕES

Dos três filtros testados, o filtro de Kraus & Pfeifer e ATIN apresentaram os mesmos erros médios em porcentagem (0,12%) e foram menores quando comparados ao filtro morfológico (0,16%), todavia as curvas de nível geradas por meio do filtro ATIN são menos ruidosas, sendo indicado o uso deste modelo para os processamentos posteriores que envolvem o uso dos modelos digitais.

Houve um deslocamento das cotas mínimas dos MDTs oriundos pelos métodos de filtragens, e foram em média de 0,94 m sendo o menor deslocamento observado pelo filtro morfológico (0,89 m).

A alta densidade da vegetação atrelada a falta de tratos silviculturais no talhão influenciaram nos resultados, impedindo uma maior penetração dos pulsos LASER no solo, dificultando a geração de modelos mais precisos. Outros estudos, com diferentes tipos de estratos arbóreos assim como com diferentes filtros devem ser realizados para verificar a precisão dos MDTs.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AXELSSON, P. DEM Generation From *LASER* Scanner Data Using Adaptive *TIN* Model. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vol. 33. Amsterdam, 2000.

CHEN, Q.; P. GONG, D.D.; BALDCCHI, G. X. Filtering airborne *LASER* scanning data with morphological methods. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 73(2):175-185, 2007a.

CHEN, Q. Airborne LiDAR data processing and information extraction. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 73(2), 109-112, 2007b.

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

ELBERINK, S. O.; MAAS, H, -G. The use of anisotropic height texture measures for the segmentation of airborne *LASER* scanner data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vol. XXXIII, Part B3, p. 674 – 684, Amsterdan, 2000.

GORGENS, E. B.; SILVA, A. G. P.; RODRIGUEZ, L. C. E. **LiDAR Aplicações Florestais**. 1. ed. Curitiba: Editora CRV v. 1. 117p, 2014.

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.

NÆSSET, E. Vertical height errors in digital terrain models derived from Airborne Laser Scanner Data in a Boreal – Alpine Ecotone in Norway. **Remote Sensing**, volume 7(4), 4702-4725; 2015.

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.

PEREIRA, J. P.; BOESING, T.; RODRIGUES, T. ; SCHIMALSKI, M. B. ; SCHAEFER, J. Avaliação de softwares livres na filtragem de dados lidar para a geração de curvas de nível. In: XI SENGEF, 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba, p. 181-185, 2014.

SILVA, A. A da. **Métodos Geoestatísticos Aplicados ao Inventário Florestal em Florestas Tropicais - Belém - Pará - Brasil**. 2011. 53 f. Dissertação (Mestrado) –Programa de Pós – graduação em Matemática e Estatística, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, UFPA, Belém, 2011.

SULAIMAN, N. S.; MAJID, Z.; SETAN, H. DTM Generation from LiDAR data by using different filters in open-source software, **Geoinformation Science Journal** 10(2): 89-109, 2010.

TEIXEIRA, L. O de. **Aplicação do LIDAR no inventário de florestas plantadas**. 2011. 118 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFLA. Lavras, 2011.

VOSSELMAN, G. Slope Based Filtering of *LASER* Altimetry Data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.33, Part B3, Amsterdam, 2000.

WAGNER, W.; EBERHÖFER, C.; HOLLAUS, M.; SUMMER, G. Robust Filtering of Airborne *LASER* Scanner Data for Vegetation Analysis. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI (Part 8/W2), p. 56 – 61, 2004.

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 20: 778–785, 2004.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; MÜLLER, M.; MARTINS, M. A. R. Avaliação da precisão altimétrica do mapeamento digital a laser em áreas de cobertura vegetal densa. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia - GO. Anais...São José dos Campos - SP: INPE, 2005. p. 757-762, 2005.

ZANDONÁ, D. F. **Potencial uso de dados provenientes de *LASER* scanner aerotransportado para extração de variáveis dendrométricas.** 2006. 92p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ZHAO, M., LIN, X., SUN, S., WANG, Y., A method to Identify Obstacles on Digital Surface Model. **Tsinghua Science and Technology, Beijing**, v. 10, n. 3, p. 323-327, 2005.

CAPÍTULO 3

USO DAS TECNOLOGIAS ALS E TLS PARA A IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES EM UMA PARCELA DE *Pinus taeda* L.

RESUMO

O objetivo deste capítulo foi utilizar duas diferentes metodologias, uma com o processamento da nuvem de pontos ALS e outro com a TLS, para o isolamento das árvores em uma parcela de *Pinus taeda*. Os processamentos dos dados ALS consistiram em classificação dos pontos em solo e vegetação, obtenção de modelos digitais (MDT, MDS e MDSn) e suavização do MDSn com diferentes janelas de busca para realçar os pixels referentes aos topos das árvores, e por fim segmentação por meio dos polígonos de Thiessen para isolamento das copas das árvores. Já com a nuvem de pontos TLS as etapas foram: registro da nuvem de pontos, delimitação da parcela, recorte das seções transversais em determinada altura, algoritmo de rotulação de componentes conexos, identificação dos troncos e isolamentos das árvores. O número de árvores identificadas pelos métodos automáticos foi comparado com a quantificação visual na parcela em campo. Foi possível a identificação correta de 60,38% das árvores na nuvem de pontos ALS e 96,23% na nuvem TLS. A falta de manejo e de tratos silviculturais aumenta o número de árvores suprimidas, dificultando a identificação dos seus picos bem como o aumento no sombreamento das árvores. Esses fatores prejudicaram na identificação automática na nuvem de pontos ALS.

Palavras-chave: LiDAR, Segmentação, Polígonos de Thiessen, Rotulação de Componentes Conexos.

CHAPTER 3

USE OF ALS AND TLS TECHNOLOGY FOR TREE AUTOMATIC IDENTIFICATION IN A *Pinus taeda L.* PLOT

ABSTRACT

This chapter's aim was to isolate the *Pinus taeda* trees using two different methodologies, the ALS and the TLS' clouds points. The ALS data processing consisted of the points classification on the ground and on the vegetation; DTM, DSM and CHM digital models attainment; and CHM smooth with different search windows to emphasize the treetops pixels and, lastly, the Thiessen's polygons segmentation to isolate the treetops. On the TLS' cloud points the steps were: cloud points register, plot delimitation, cross sections cut at one point, connected components labeling algorithm, trunks identification and trees isolation. The amount of the trees identified through the automatic methods was compared to the visual quantification on the field. It was possible correctly identify 60,38% of the trees through the ATS and 96,23% through the TLS clouds points. The lack of correct handling and silvicultural treatment increased the amount of suppressed trees, making it harder to identify the treetops as well as the trees shading. Those factors affected the automatic identification negatively in ALS points cloud.

Keywords: LiDAR, Segmentation, Thiessen's Polygons, Connected Components Labeling.

1 INTRODUÇÃO

Na nuvem de pontos, tanto as obtidas por meio do TLS como ALS, é importante que se faça a detecção dos pontos pertencentes às árvores. Esta etapa é de fundamental importância para o isolamento das árvores a fim de proceder para a extração das variáveis dendrométricas necessárias. Devido às diferenças entre plantios (espécie, idade, posicionamento das árvores, tratos silviculturais, declividade do terreno, etc.) faz-se necessária a criação de algoritmos específicos visando à eficiência na detecção automática das árvores.

Conforme citado no capítulo 1, subitem 2.2.1.2, alguns dos algoritmos criados para detecção de árvores na nuvem de pontos oriunda da varredura *LASER* terrestre utilizam a transformação *Hough*, que seria a tendência do fuste em formar circunferências (SIMONSE *et al.*, 2003; ASCHOFF e SPIECKER., 2004; BIENERT *et al.*, 2007; SCHILLING *et al.*, 2011). Outros algoritmos, baseiam – se no ajuste de um cilindro nos pontos que representam uma árvore, onde um limiar é pré-estabelecido (baseado no desvio padrão dos pontos) e são eliminados aqueles pontos que não representam a superfície de uma árvore (LIANG *et al.*, 2012; LIANG e HYYPÄ, 2013). Porém, estes autores comentam da dificuldade em se identificar corretamente 100% das árvores presentes em uma parcela devido ao sombreamento das árvores por galhos, outras árvores e sub-bosque denso.

Olofsson *et al.* (2014) conseguiram identificar quase 100% das árvores não sombreadas através do método RANSAC (*Random Sample Consensus*) em parcelas com raios de 20 metros numa floresta do sul da Escandinávia (*Picea abies*, *Pinus sylvestris* e *Betula spp.*). A medida que a distância de varredura aumenta, o sombreamento das árvores também e consequentemente diminui o número de árvores detectadas corretamente.

Para a identificação das árvores na nuvem de pontos ALS, é realizada o delineamento das copas utilizando a segmentação, que consiste dividir uma imagem, em unidades homogêneas, considerando algumas de suas características intrínsecas como, por exemplo, a uniformidade espectral dos pixels, sua textura e contraste (WOODCOCK *et al.*, 1994; FARIA e CENTENO, 2005). A maior parte destes estudos utiliza o MDSn, que é a subtração do MDT do MDS, e posteriormente para a segmentação são realizadas algumas operações como suavização, determinação dos pontos sementes e a delimitação dos objetos de interesse (FARIA e CENTENO, 2005).

Assim como na nuvem de pontos TLS, alguns autores como Koch *et al.* (2006); Kumar (2012); Pereira (2014) e Oliveira *et al.* (2014) também relatam problemas em isolar 100% das copas das árvores em uma parcela, cujos problemas podem estar ligados à dificuldade em isolar as árvores dominadas, alta densidade da floresta e estrutura das copas de algumas espécies. Maiores detalhes, estão na revisão sobre aplicações florestais do ALS no capítulo 1, subitem 2.3.1.

Dada a importância da identificação automática das árvores para o posterior processamento da nuvem de pontos para a determinação de variáveis dendrométricas, este capítulo teve como objetivo identificar de maneira automática, tanto pela nuvem de pontos TLS como ALS, as árvores presentes em uma parcela de *Pinus taeda* de 16 anos, e comparar a precisão dos algoritmos testados com a contagem visual das árvores em campo.

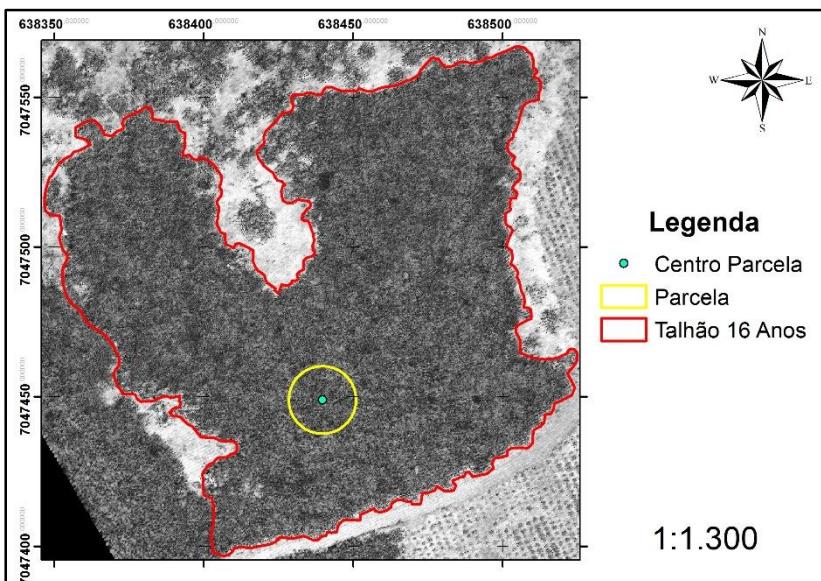
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. INSTALAÇÃO DA PARCELA EM CAMPO

A instalação da parcela em campo está descrita no capítulo um, subitem 3.2, e todas árvores presentes foram numeradas com tinta spray branca e quantificadas visualmente. Esta quantificação serviu como parâmetro para a comparação com os métodos testados de identificação automática de árvores nas nuvens de pontos ALS e TLS.

Após instalada, o centro da parcela foi georreferenciado utilizando técnicas de poligonal enquadrada (capítulo dois, subitem 2.1). Isto serviu para a localização da parcela dentro da nuvem de pontos ALS assim como para alojar corretamente o equipamento TLS em campo e prosseguir com os processamentos de identificação de árvores. Também foi realizado um *buffer* com a área da parcela, para que somente as árvores naquela área sejam quantificadas (Figura 1).

Figura 1 – Localização da parcela no talhão de 16 anos de *Pinus taeda*.

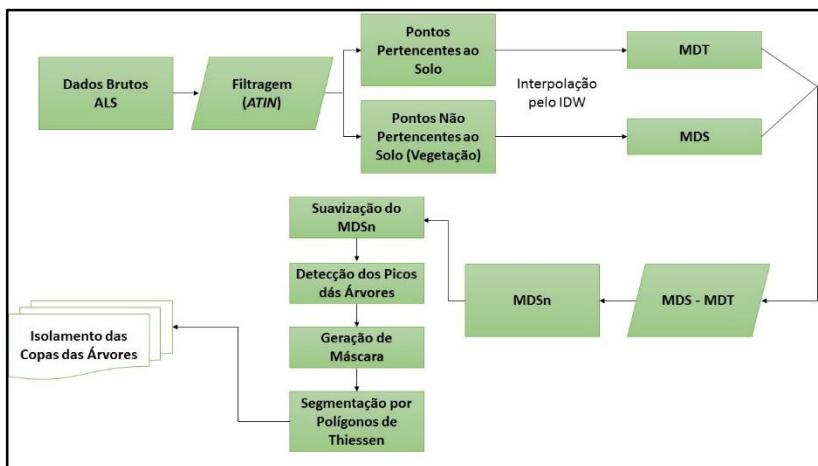


Fonte: produção do próprio autor.

2.2. PROCESSAMENTO DA NUVEM ALS

Para um melhor entendimento dos passos para o delineamento das copas na nuvem de pontos ALS, é apresentado na Figura 2 um fluxograma com as etapas do processamento. A metodologia empregada é uma adaptação das metodologias utilizadas por Kumar (2012) em florestas de coníferas na França e Pereira (2014) em árvores isoladas de *Araucaria angustifolia*.

Figura 2 – Fluxograma do processamento da nuvem ALS para o isolamento das árvores.



Fonte: produção do próprio autor.

Nos tópicos a seguir, serão explicadas cada uma das partes do processamento para o isolamento das árvores. Os processamentos foram todos realizados no *software ArcGis 10.2.1*.

2.2.1. Classificação dos pontos

Esta etapa foi amplamente comentada no capítulo dois, em que diferentes filtros foram testados para esta finalidade. O filtro que obteve o melhor desempenho foi o *Adaptive TIN*, disponível gratuitamente no *software LasTools*.

2.2.2. MDSn

O Modelo Digital de Superfície Normalizada é obtido por meio da subtração do Modelo Digital de Superfície pelo Modelo Digital do Terreno. Após o processamento no *software*

LasTools para a classificação dos pontos, dois arquivos *raster* foram gerados. O primeiro corresponde ao MDS interpolado, a partir dos dados do primeiro retorno, e a segunda imagem é referente ao MDT interpolado, a partir dos pontos pertencentes ao solo. Todas as imagens possuem uma resolução geométrica de 0,1 m A interpolação foi realizada utilizando o Inverso da Distância a Potência (IDW).

A subtração entre o MDT e o MDS para a obtenção do MDSn, foi realizada utilizando a ferramenta *Raster Calculator*.

2.2.3. Suavização do MDSn

A suavização da imagem é utilizada para a redução de ruídos e para a remoção de pequenos detalhes na imagem antes da extração dos objetos (FARIA & CENTENO, 2005). Neste caso, a suavização do MDSn tem como objetivo realçar os picos das árvores, ou seja, o ponto mais alto, que será necessária para a aplicação dos polígonos de Thiessen no isolamento das copas das árvores.

A ferramenta utilizada é a *Focal Statistics* que de acordo com Pereira, (2014) realiza uma operação de vizinhança nos pixels da imagem. Com isso os valores de cada pixel da imagem gerada pós a aplicação da ferramenta são função dos valores dos pixels de entrada que estão ao redor de uma vizinhança específica.

2.2.4. Detecção dos Picos das Árvores

Nesta etapa são utilizadas janelas de busca, que na verdade são matrizes de pixels com dimensão variável, para encontrar o pixel de maior valor referente aos topos das árvores por meio das ferramentas *Raster Calculator* e *Focal Statistics*.

A imagem de entrada é o MDSn suavizado, e como resultado é gerada uma imagem que conterá pixels apenas dos

pontos referentes ao topo das árvores, à qual é convertida para um arquivo *shapefile* de pontos (PEREIRA, 2014).

2.2.5. Geração da Máscara de Lacunas

A máscara de lacunas tem como objetivo estabelecer um limiar para a remoção de espaços vazios e vegetação abaixo de uma determinada altura para facilitar a detecção das árvores, visto que abaixo deste limiar a vegetação não representa as árvores e sim o sub-bosque presente no talhão.

Assim, a partir do MDSn uma imagem binária foi gerada em que o valor “0” foi atribuído aos pixels inferiores a este limiar (aqui definido em 2 m, baseado no sub-bosque presente na região de estudo) e “1” a todos os pontos iguais ou superiores a 2 m, conforme descrito por Pereira (2014).

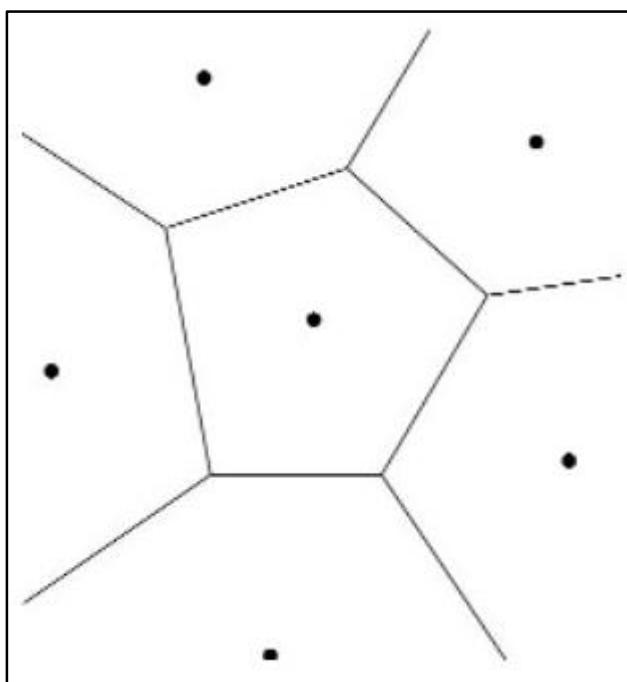
2.2.6. Segmentação por Polígonos de Thiessen

No isolamento das copas das árvores, os polígonos de Thiessen funcionam de maneira similar à segmentação por regiões de crescimento que é uma técnica de agrupamento de dados, que agrupa pixels que apresentam características semelhantes e na qual somente as regiões espacialmente adjacentes podem ser agrupadas. Neste processo, inicialmente um pixel pertencente à região a ser segmentada é fornecido (pixel semente) e a partir deste se inicia todo o processo de agregação (crescimento) anexando a ele os pixels vizinhos com características similares (GONZALES & WOODS, 2011). Os pontos máximos obtidos na etapa anterior são marcados como pontos semente se o valor do pixel for maior que a sua vizinhança. A medida que as regiões vão sendo agrupadas ela é rotulada e seus atributos são extraídos (FARIA & CENTENO, 2005).

A construção do polígono de Thiessen, também denominado de Diagrama de Voronoi ou Tesselação de

Delaunay, ocorre primeiramente selecionando um conjunto de pontos (P) não colineares, onde $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ com $p > 2$, no plano Euclidiano denominados de “pontos geradores” que aqui, no caso, são os picos das árvores. Entre estes pontos são traçadas retas equidistantes entre si, que formarão as bordas dos polígonos. Cada polígono fechado e adjacente a outro, contendo apenas um dos pontos geradores forma o Polígono de Thiessen (Figura 3) (REZENDE *et al.*, 2000).

Figura 3 – Polígonos de Thiessen.



Fonte: Rezende *et al.*, 2000.

A segmentação utilizou a ferramenta *Create Thiessen Polygons*, em que os picos das árvores identificados anteriormente foram o arquivo de entrada. Estes pontos serviram como pontos de referência para a criação dos polígonos de

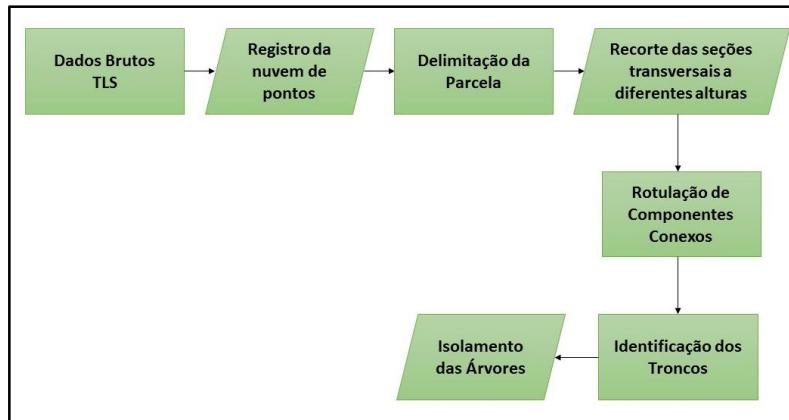
Thiessen. Posteriormente, os polígonos de Thiessen são atualizados fazendo uso da máscara de lacunas gerada anteriormente. Nesta operação é feita uma operação de concatenação entre os polígonos de Thiessen e a máscara de lacunas. A partir disso, obtém-se os segmentos delimitando as copas de cada árvore juntamente com os espaços vazios entre as copas (PEREIRA, 2014).

Depois da delimitação das copas, foi realizado um *clip* com o segmento da copa para se isolar as árvores e determinar as variáveis dendrométricas

2.3. PROCESSAMENTO DA NUVEM TLS

As etapas do processamento da nuvem de pontos TLS com o intuito de identificar automaticamente as árvores na parcela de *Pinus taeda*, podem ser vistas no fluxograma da Figura 4, e serão melhor detalhadas nos tópicos a seguir.

Figura 4 - Fluxograma do processamento da nuvem TLS para a identificação automática de árvores.



Fonte: produção do próprio autor.

2.3.1. Registro da Nuvem de Pontos

Conforme citado no capítulo 1, item 3.2.3 que comenta sobre a coleta de dados com o TLS, a varredura *LASER* terrestre foi realizada em 5 diferentes posições na parcela, para garantir que todos os fustes das árvores fossem recobertos por pontos *laser* e evitar zonas de sombra.

Cada estação *LASER* adota um sistema de coordenadas local. Para uma análise das nuvens de pontos de cada varredura em conjunto, ou seja, a varredura múltipla (ver capítulo 1, subitem 2.2.1.1) faz-se necessária a transformação de todos os sistemas de coordenadas locais em um sistema de coordenadas único. Este processo é denominado de registro da nuvem de pontos (BIENERT & MAAS, 2009), e é uma etapa essencial para o trabalho com varreduras múltiplas.

Como na parcela há diversos pontos com as coordenadas conhecidas devido ao levantamento com a estação total (Capítulo 2, subitem 2.1) incluindo o centro, os pontos em que foi instalado o equipamento TLS foram determinadas utilizando o método da recessão, que consiste na determinação da coordenada de um ponto desconhecido (ponto onde o equipamento foi instalado) a partir de visadas de no mínimo três pontos com coordenadas conhecidas (McCORMAC, 2010). Nestes pontos eram colocados os alvos plano refletores para servir como referência e verificar se no ponto em que o equipamento TLS estava instalado era possível ver outros 3 pontos com as coordenadas conhecidas. Além do centro da parcela, mais um ponto de ré com coordenadas conhecidas foi utilizado como referência de coordenadas conhecidas para os outros pontos.

Determinando as coordenadas das diferentes estações *LASER*, foi possível estabelecer as varreduras no sistema de referência terrestre, e com isso o registro foi realizado. Esta etapa foi realizada no *software* próprio para o equipamento *Leica ScanStation P40*.

2.3.2. Delimitação da Parcela

Posteriormente ao registro, a nuvem de pontos foi recortada com um algoritmo implementado em VBA (*Visual Basic for Applications*) para a área de 400m² utilizando como origem o centro da parcela, para realização dos processamentos seguintes. Este tamanho foi o mesmo utilizado na parcela delimitada em campo para quantificação visual das árvores presentes. O recorte foi baseado no centro da parcela, em que as coordenadas de onde o equipamento foi instalado eram conhecidas.

2.3.3. Recorte de Seção Transversal

Esta etapa teve como intuito recortar a nuvem de pontos em uma seção transversal de determinada altura, para representar apenas uma parte do fuste árvore e foi realizada no *software CloudCompare*. A altura foi escolhida baseado em que foi visto no campo de tal maneira que fosse possível eliminar pontos que não representassem porção do tronco da árvore como galhos e sub-bosque.

A altura desta seção foi estabelecida em um metro, e as árvores serão representadas na nuvem de pontos por formas cilíndricas. Com este recorte será aplicado o algoritmo de rotulação de componentes conexos.

2.3.4. Algoritmo de Rotulação de Componentes Conexos

O algoritmo de Rotulação de Componentes Conexos (*Label Connected Components*) é muito utilizado na área de visão computacional e reconhecimento de padrões de imagens digitais. O procedimento separa as diferentes entidades presentes, rotulando-as (*label*), de acordo com a análise de sua relação de semelhança com a “vizinhança”, sendo bastante

estudado para aumentar a eficiência da identificação dos elementos (SAMET, 1981; SHAPIRO & STOCKMAN, 2001).

A rotulação de componentes conexos não se limita somente a arquivos bidimensionais como as imagens digitais. Com pouco ajustes é possível segmentar uma “nuvem de pontos” em partes menores, separadas por uma distância mínima desejada. Cada agrupamento de pontos é um componente conexo. A eficiência na separação está relacionada a pré-processamentos de acordo com a quantidade de ruído presente na varredura (RUTZINGER *et al.*, 2010; SCHILLING & MAAS, 2014a).

Este algoritmo foi utilizado com a finalidade de filtrar os pontos não pertencentes aos fustes das árvores. Neste processamento restam somente os pontos que, apresentando alguma relação de proximidade espacial, são considerados como fazendo parte de componente conexo. Assim, devido à maior densidade de pontos nas áreas referentes aos fustes, nas nuvens de pontos, necessitou-se fornecer um valor mínimo que corresponde ao menor número de pontos que um componente conexo deve conter e que este valor seja condizente com a densidade obtida pelo seccionamento das nuvens de pontos.

O procedimento, utilizando a ferramenta *Label Connected Components* presente no software CloudCompare, solicita do usuário duas variáveis: nível da *Octree* (malha tridimensional) e número mínimo de pontos por componente. Foram realizados diversos ensaios alterando estas duas componentes até que fossem encontrados resultados satisfatórios. Os valores que melhor se adequaram às nuvens de pontos deste trabalho foram: nível 10 do *Octree* (tamanho de cada célula da malha em torno de 0,03m) e 1000 como o número mínimo de pontos por componente, representando a seção da árvore. Após esse procedimento, os componentes conexos que estão separados em arquivos diferentes são fusionados em um arquivo para o procedimento de identificação e isolamento dos troncos.

2.3.5. Identificação e Isolamento dos Troncos

Este arquivo fusionado possui as coordenadas X, Y do centro de cada uma das seções das árvores. Com isso, em ambiente VBA, é estabelecido um limiar de busca a partir das coordenadas. Foi estabelecido o limiar de 0,2 m; em que todos os pontos que forem encontrados acima deste limiar não devem ser considerados como pontos das árvores. Os pontos candidatos a representar a árvore passam por um procedimento em que é verificada a sua proximidade entre os pontos selecionados confirmando sua detecção como tronco. Para tal é utilizada a relação espacial, no qual fornece-se a distância mínima que um pixel (bidimensional) ou ponto (bi ou tridimensional) deve estar espaçado do seu “vizinho” mais próximo (BELFOR *et al.*, 1994). Neste trabalho, utilizou-se o método por espaçamento mínimo entre pontos. O valor de distância mínima escolhido foi de 2,0 m. Valor este relacionado com o menor espaçamento entre as árvores no plantio.

Após todos os pontos serem classificados entre pertencentes ou não as árvores, é feito o isolamento destas árvores em um arquivo .txt com as suas coordenadas X, Y, Z. Com as árvores isoladas, elas serão processadas para a determinação das variáveis dendrométricas.

2.4. AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS

A avaliação das metodologias utilizadas na identificação automática de árvores nas nuvens ALS e TLS, será realizada comparando com o número de árvores contadas visualmente na parcela de *Pinus taeda* com 16 anos de idade, em que serão calculados os seguintes índices de acurácia (Equações 1 a 3):

$$\text{Erro de Omissão} (\%) = \frac{N^{\circ} \text{ Arv não detectadas}}{N^{\circ} \text{ Total de Árvores}} \quad \text{eq. 1}$$

$$\text{eq. 2}$$

$$\textbf{\textit{Erro de Comissão}} (\%) = \frac{N^{\circ} \text{ Arv detectadas erroneamente}}{N^{\circ} \text{ Total de Árvores}}$$

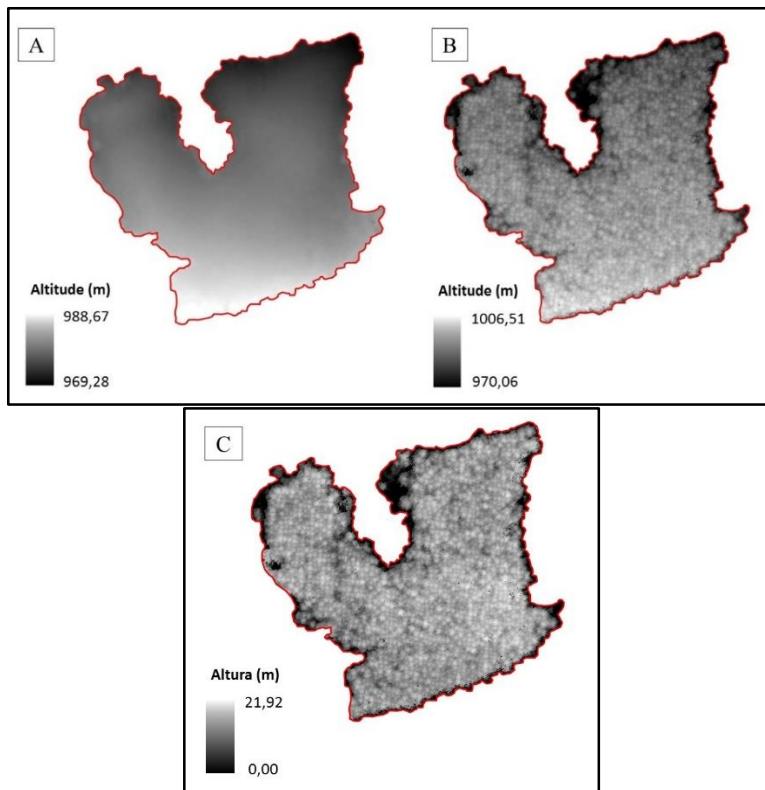
$$\textbf{\textit{Acerto}} (\%) = \frac{N^{\circ} \text{ Arv detectadas corretamente}}{N^{\circ} \text{ Total de Árvores}} \text{ eq. 3}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. MODELOS DIGITAIS

Com a nuvem de pontos ALS previamente classificada, conforme capítulo 2, e com a interpolação destes pontos foi possível extrair, o modelo digital do terreno (proveniente do primeiro retorno, que no caso é referente ao solo) e o modelo digital de superfície (proveniente do segundo retorno, que no caso corresponde a vegetação). A subtração entre do MDT no MDS gerou o MDSn (Figura 5). Com o MDSn, foi realizada as outras etapas para a identificação das árvores por meio dos polígonos de Thiessen.

Figura 5 – Modelos Digitais. A) MDT; B)MDS; C)MDSn



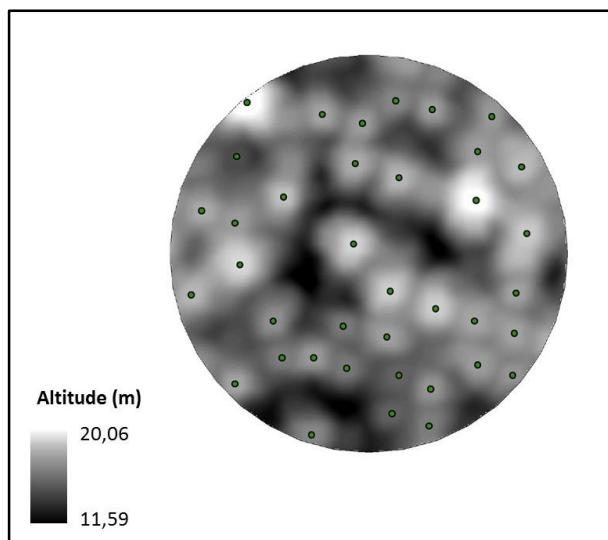
Fonte: produção do próprio autor.

O MDT variou de 963,28 a 988,67 m, e considerando toda a vegetação existente nele, no caso o MDS, variou de 970,06 e 1006,51 m. O MDSn passam a ter dados apenas referente aos objetos, uma vez que o terreno é removido. Neste caso os objetos são as árvores, e ele variou de 0,00 até 21,92 m, indicando a altura da maior árvore daquele talhão.

3.2. SEGMENTAÇÃO PELOS POLIGONOS DE THIESSEN

A partir do MDSn, foram realizadas suavizações com intuito de realçar os picos das árvores. A Figura 6 demonstra a parcela recortada, com a suavização e os picos representando o ponto mais alto das árvores (topo).

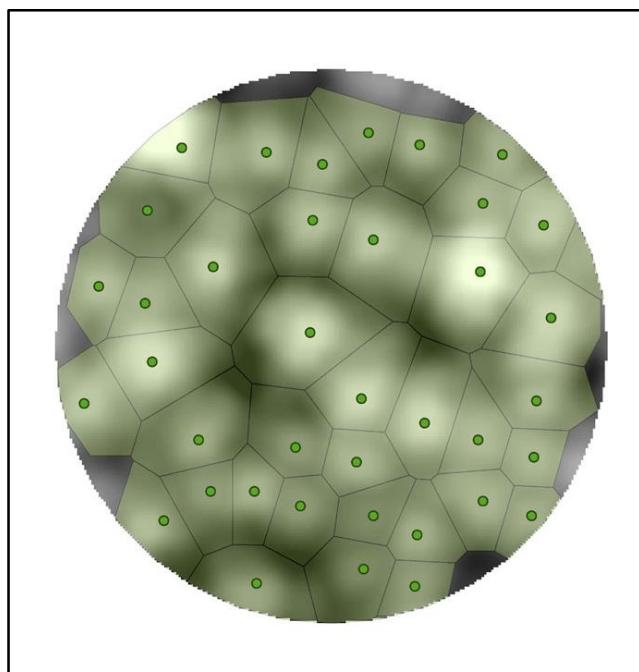
Figura 6 – MDSn suavizado com os picos das árvores.



Fonte: produção do próprio autor.

O processo de segmentação pelos polígonos de Thiessen para a individualização das árvores do plantio de *Pinus taeda* identificou ao todo 69,81% das árvores presentes na parcela (Figura 7).

Figura 7 – Segmentação das árvores de *Pinus taeda*.

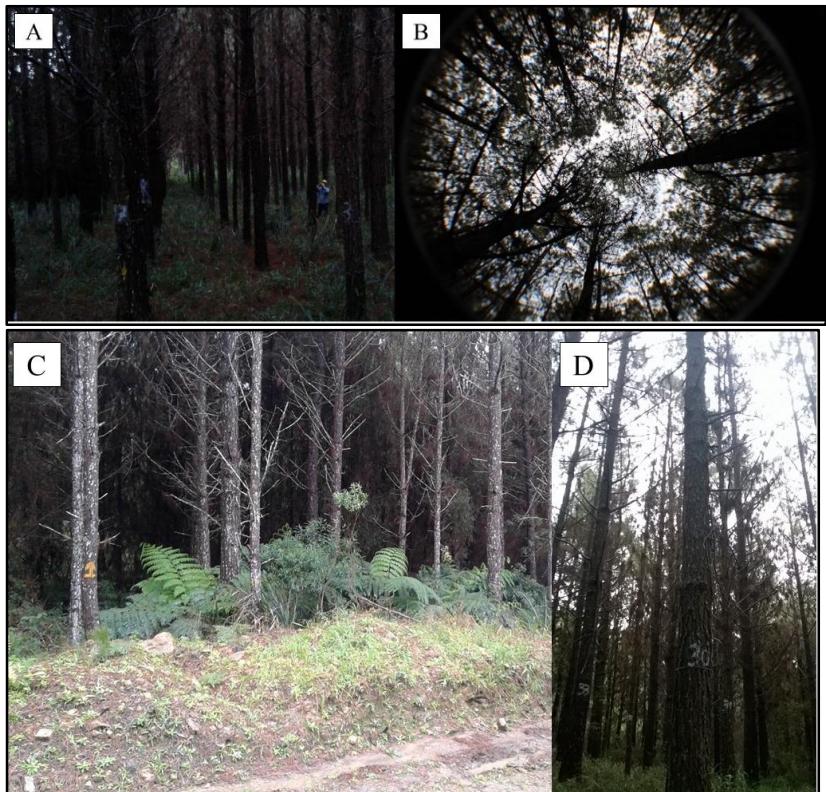


Fonte: produção do próprio autor.

O plantio em questão com idade de 16 anos não possuía tratos silviculturais, ou seja, não havia poda. Com isso, a galhada das árvores era muito densa, entrelaçando com as vizinhas no povoamento. Além disso, devido a de manejo no plantio, ocorreu um elevado número árvores dominadas abaixo do dossel. Como o algoritmo proposto neste estudo procura o *local máxima*, que são os pixels de maior valor referente aos picos das árvores, as árvores suprimidas tiveram suas copas oclusas pelas árvores de maior porte, impossibilitando que estas árvores tivessem seus picos detectados, consequentemente não sendo identificadas diminuindo assim o número de árvores classificadas corretamente. A Figura 8 mostra um diagnóstico fotográfico do talhão, em que A) Representa o interior do talhão;

B) Fotografia hemisférica das copas das árvores; C) Entrada para o talhão; D) Detalhe da galhada no interior do talhão.

Figura 8 – Fotografias das árvores do talhão.

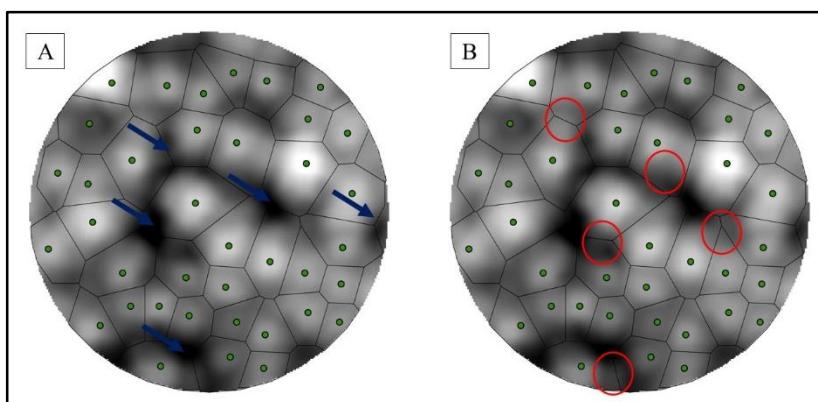


Fonte: produção do próprio autor.

Devido à elevada densidade de árvores no plantio (cerca de 1.275 arv. ha^{-1} , de acordo com o inventário contínuo da empresa) o método se mostrou limitado ocasionando os seguintes erros na segmentação: árvores não – identificadas, no caso suprimidas que foram encobertas pelas dominantes; árvores identificadas erroneamente, em que duas árvores são consideradas como uma. Na Figura 9 pode ser observada estas

inconsistências na segmentação, em que as setas azuis indicam árvores que não foram identificadas, e os círculos vermelhos árvores identificadas erroneamente.

Figura 9 – Inconsistências na segmentação. A) Árvores suprimidas e não identificadas; B) Árvores identificadas erroneamente.



Fonte: produção do próprio autor.

Comparando o método automático de delineamento das copas das árvores por meio dos polígonos de Thiessen com a análise visual do número de árvores em campo, o método automático obteve um erro de omissão de 30,19% e um erro de comissão de 9,43%, totalizando assim em 60,38% de árvores corretamente identificadas (diferente dos 69,81% identificados a todo).

Os resultados acima estão abaixo dos encontrados por Kumar (2012) e Pereira (2014), que utilizando a mesma metodologia de segmentação por polígonos de Thiessen, detectaram corretamente 96% e 91,7%, respectivamente. As florestas no estudo de Kumar (2012), eram florestas naturais já estabelecidas de coníferas, com grande parte das espécies ocupando o dossel superior. Já Pereira (2014) afirma que a

espécie. *A. angustifolia* por apresentar uma característica bastante particular, sua extração se torna facilitada em áreas de campo principalmente pelo fato da mesma sobressair em relação as demais espécies em campos da Floresta Ombrófila Mista.

Zandoná *et al.*, (2008), em um plantio de *Pinus taeda* com 40 anos de idade, comentam que os algoritmos para identificação de árvores possuem desempenho inferior em áreas mais densas, dificultando a identificação de árvores co-dominadas e dominadas.

Em florestas de coníferas na Finlândia, Pitkänen *et al.* (2004), testaram três diferentes métodos de detecção de árvores baseados no MDSn. Os melhores resultados, foram encontrados utilizando a suavização do MDSn com a utilização do *local máxima* para encontrar os picos das árvores. Mesmo este sendo o melhor método, o número de árvores detectadas corretamente foi baixo (49,2%), e 10% de detecções errôneas devido à alta densidade das árvores e a grande diferença entre os estratos das árvores dominantes, co-dominantes e dominadas, suprimindo as árvores abaixo do dossel, inviabilizando assim sua detecção. Os autores ainda comentam devem ser realizados ajustes nos métodos de filtragens do MDSn para detecção melhor dos picos.

O MDSn suavizado é de vital importância na detecção de picos. O processo de detecção de picos é diretamente relacionado com o tamanho de janela utilizada. Caso seja utilizada uma janela pequena de 3 por 3 pixels, por exemplo, será possível detectar mais picos reconhecendo indivíduos de menor porte em um fragmento florestal. Porém, também ocasionará na detecção de múltiplos picos em árvores de grande porte, como pode ser visto na Figura 9. Utilizando janelas de tamanho maior, como exemplo 8 por 8 pixels, são generalizados os picos em fragmentos mais densos (Figura 9). Esta generalização ocorre devido a janela de procura muito grande. A cada matriz de 8 por 8 pixels, o pixel de maior valor será armazenado. Portanto, árvores de menor porte muito próximas a árvores de grande porte, serão omitidas (PEREIRA, 2014).

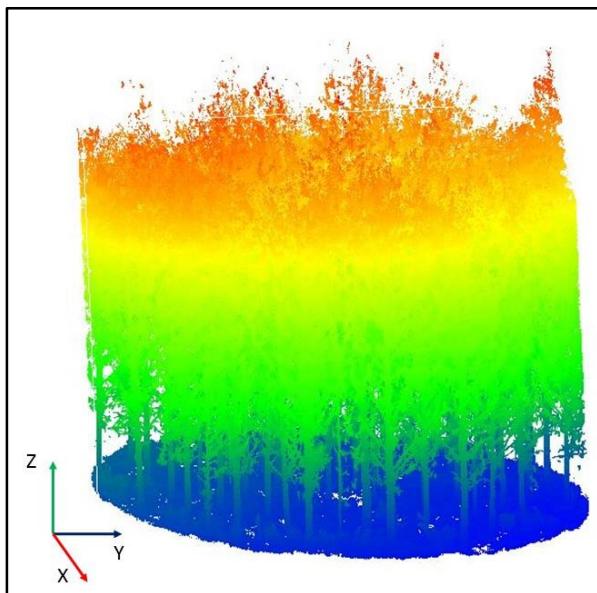
Reitberger *et al.*, (2007) comentam que informações adicionais sobre as árvores na área de estudo conjuntamente com o processamento do MDSn levam a uma melhoria na taxa de detecção das árvores em camadas intermediárias. Neste estudo, foi possível a identificação de 53% das árvores presentes em uma floresta de coníferas. Os dados eram oriundos de *LIDAR full waveform* de alta densidade e foi utilizada uma metodologia combinada de segmentação por meio da identificação dos *local máxima* no MDSn com detecção de troncos baseado no algoritmo RANSAC. A combinação melhorou um pouco a taxa de identificação das árvores, porém novamente é comentada a importância de uma suavização adequada do MDSn para uma melhor identificação dos picos para o isolamento correto das árvores, bem como dificuldade em identificar árvores em estratos inferiores.

Considerando os fatores da falta de manejo e tratos silviculturais aumentando o número de árvores suprimidas abaixo do dossel e árvores com muita galhada na área de estudo, foram identificadas mais da metade das árvores presentes na parcela, sendo possível a aplicação dos outros processamentos para extrair variáveis dendrométricas.

3.3. REGISTRO E DELIMITAÇÃO DA PARCELA NA NUVEM TLS

Após o registro da nuvem de pontos pelo método da recessão, ela foi recortada de acordo com os limites da parcela de inventário florestal implementada em campo visando a diminuição no tamanho do arquivo referente a nuvem de pontos e consequentemente menor tempo de processamento dos algoritmos (Figura 10). A nuvem de pontos original O arquivo bruto possuía 101.866.560 de pontos, e após o recorte a nuvem ficou com 36.528.409 pontos.

Figura 10 – Recorte da nuvem de pontos registrada.

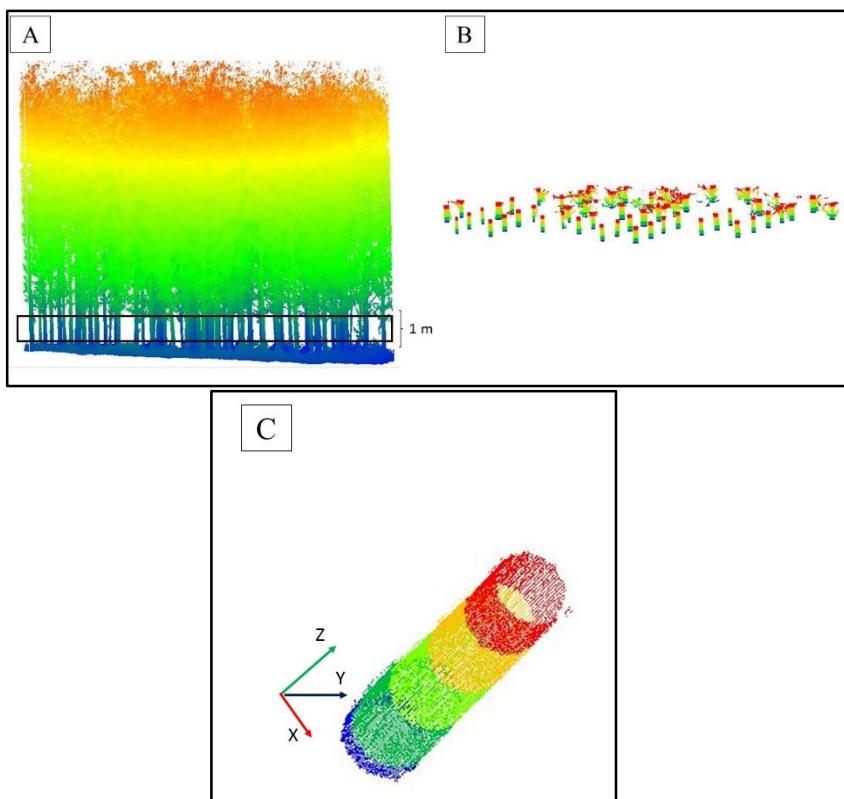


Fonte: produção do próprio autor.

3.4. RECORTE DE SEÇÃO TRANSVERSAL

Na Figura 11 está demonstrado o recorte da seção transversal de 1 m, bem como os cilindros representando as árvores. Com este arquivo foi aplicado o algoritmo de Rotulação de Componentes Conexos.

Figura 11 – A) Nuvem de pontos recortada com detalhe da seção transversal; B) Seção transversal de 1 m; C) Cilindro representando o tronco de uma árvore.



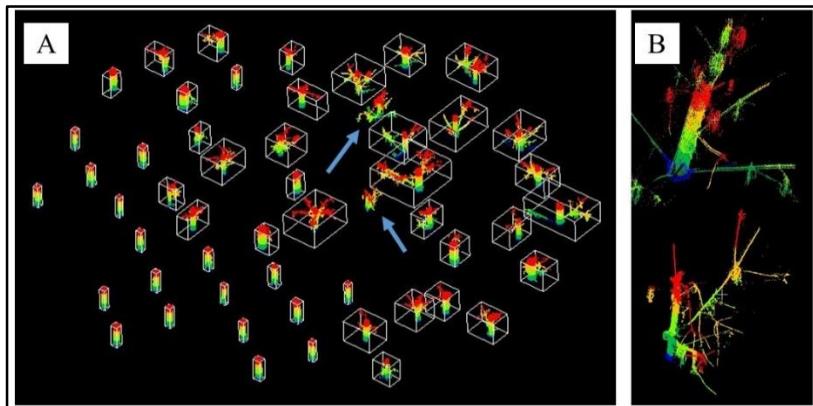
Fonte: produção do próprio autor.

3.5. IDENTIFICAÇÃO DOS TRONCOS

Por meio do algoritmo de componentes conexos, foi possível identificar corretamente 96,23% das árvores na parcela de *Pinus taeda*. As árvores que não foram detectadas, possuíam muitos galhos nas porções mais baixas do fuste, assim no momento do recorte da seção transversal a nuvem de pontos representando a árvore não possuía o número de pontos suficientes para a *Octree*

identificar como árvore. Na Figura 12A é possível visualizar as árvores que não foram identificadas e na Figura 12B o detalhe dos troncos das duas árvores que foram separadas manualmente.

Figura 12 – Identificação de troncos na nuvem TLS.



Fonte: produção do próprio autor.

Os resultados encontrados estão muito próximos aos encontrados por SIMONSE *et al.*, (2003); BIENERT *et al.*, (2007); SCHILLING *et al.*, (2011); LIANG & HYPPA (2013); SCHILLING *et al.*, (2014b), cujas taxas de detecção foram maiores que 90%. Estes autores comentaram que em varreduras múltiplas, devido a um maior recobrimento dos troncos das árvores, torna a detecção mais fácil, bem como em povoados manejados e com tratos silviculturais são mais difíceis acontecerem problemas na identificação de árvores, resultando em um grande número de árvores identificadas com a automatização deste processo (LIANG *et al.*, 2012). Porém, mesmo com varreduras múltiplas, podem ocorrer alguns sombreamentos das árvores, principalmente em florestas onde não há espaçamento ou onde o espaçamento não esteja muito bem definido que é o caso deste estudo.

Neste estudo, apesar do plantio não manejado, a detecção foi muito satisfatória devido a maior parte das árvores terem as porções mais baixas dos fustes livre de galhos possibilitando ao algoritmo detectar com uma acurácia elevada todas as árvores na parcela. Comparando com o isolamento de copas na nuvem ALS, a identificação dos troncos das árvores se mostrou mais adequada para o isolamento automático das árvores. A Tabela 1 demonstra um comparativo entre o número de árvores observadas em campo, e os identificados automaticamente nas nuvens TLS e ALS.

Tabela 1 – Avaliação dos diferentes métodos de identificação automática das árvores.

	Nº de árvores identificadas	Acerto (%)	Erro de Omissão (%)	Erro de Comissão (%)
Segmentação (ALS)	37	60,38	30,19	9,43
RCC* (TLS)	51	96,23	3,77	0
Contagem em campo	53			

*Algoritmo de rotulação de componentes conexos.

Fonte: produção do próprio autor.

Com base na Tabela 1, verifica-se que não houve erro de comissão na identificação de árvores na nuvem TLS, ou seja, não houveram árvores identificadas incorretamente, isso pode ser explicado pelo fato de a nuvem TLS trabalhar com pontos do tronco, e não com pontos da copa e do solo, não havendo problemas caso a árvore esteja no dossel inferior. Todavia, caso a árvore esteja sombreada, com sub-bosque muito alto e presença de galhos em partes inferiores do tronco, poderá acarretar problemas para a identificação das árvores já que os pulsos *LASER* não chegaram ao tronco das árvores, ou não serão em número suficiente para identificar como árvore. Neste estudo as duas árvores que não puderam ser identificadas possuíam uma grande galhada em porções baixas do tronco, com isso o

algoritmo não identificou aquele conjunto de pontos como árvore, devido à ausência de pulsos *LASER* que formassem o cilindro indicando uma árvore.

Na nuvem ALS, as florestas densas dificultam a penetração dos pulsos *LASER* nos estratos inferiores da floresta, com isso as árvores que estão abaixo do dossel dificilmente terão pontos que as representem, diminuindo a possibilidade de serem identificadas automaticamente já que se encontram suprimidas. Na parcela em que este estudo foi conduzido, apesar das árvores terem sido plantadas na mesma data, a falta de tratos silviculturais e de manejo na área fez que estivessem lá presentes árvores altas (dominantes e co – dominantes) e árvores médias e baixas (dominadas). As árvores altas impedem a penetração dos pulsos nas árvores baixas, assim não sendo representadas na nuvem de pontos ALS ou se representandas, com pontos insuficientes podendo ser confundida com a copa das árvores mais altas. Copas densas também podem gerar ambiguidade nos resultados, já que não se sabe a qual árvore pertencem.

4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram testadas duas diferentes abordagens para a identificação de árvores em uma parcela de *Pinus taeda*. Uma delas por meio da segmentação das copas utilizando polígonos de Thiessen em MDSn oriundo da nuvem de pontos ALS; e outro por meio da identificação de troncos com um algoritmo de rotulação de componentes conexos na nuvem TLS. Em nenhuma das metodologias propostas foi possível a identificação de todas as árvores, porém o processamento da nuvem TLS teve melhores resultados (96,23% das árvores identificadas corretamente) que o processamento da nuvem ALS (60,38%).

A falta de manejo no plantio para a retirada das árvores suprimidas, ou seja, aquelas que estão abaixo do dossel bem como a falta de tratos silviculturais para a remoção de galhos nas

árvores, dificultam a localização dos picos das árvores no MDSn na nuvem ALS e também podem ocasionar maior sombreamento nas árvores atrapalhando o recobrimento total das árvores com pulsos TLS.

Outros estudos devem ser realizados com diferentes posicionamentos do equipamento TLS para evitar oclusão de pontos e zonas de sombreamento das árvores; bem como voos ALS com maiores densidades e/ou sensores do tipo *full-wave* para maior penetração dos pulsos *LASER* na floresta devem ser realizados, inclusive a integração destes sensores para que seja possível identificar todas as árvores corretamente pelos métodos automatizados.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in *LASER scanner* data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36 – 8/w2. Freiburg, 2004.

BIENERT, A., *et al.* Tree detection and diameter estimations by analysis of Forest terrestrial laserscanner point clouds. **ISPRS Workshop on LASER Scanning 2007 and SilviLASER 2007**. Finland, 2007.

BIENERT, A.; MAAS, H- G. Methods for the automatic geometric registration of terrestrial laser scanner point clouds un forest stands. **Laserscanner Workshop**, Paris, France, p. 93 - 98, 2009.

FARIA, F. C. C.; CENTENO, T. M.. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a laser para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. **Anais...**, p. 737-744, 2005.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo, SP: Editora Blücher, 624 p, 2011.

KOCH, B.; HEYDER, U.; WEINACKER, H. Detection of individual tree crowns in airborne *LIDAR* data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n° 4, p 357 – 363, 2006.

KUMAR, V. **Forest inventory parameters and carbon mapping from airborne LIDAR**. Dissertação de mestrado apresentada a Faculdade de Ciências da Geo-informação e Observação da Terra da Universidade de Twente. feb. 2012.

LIANG, X.; LITKEY. P.; HYYPÄ, J.; KAARTINEN, H.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial *LASER* scanning. **Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, no. 2. P. 661 – 670, 2012.

LIANG, X.; HYYPÄ, J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial *LASER* scans at the feature and decision levels. **Sensors**, 13. p. 1614 – 1634, 2013.

McCORMAC, J. **Topografia**. 5° ed. Rio de Janeiro, RJ. Editora LTC, 391 p, 2010

OLIVEIRA, L. T de.; CARVALHO, L. M. T de.; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T. C. A.; BATISTA, V. T. F. P. Influência da idade na contagem de *Eucalyptus* sp. com dados *LIDAR*. **CERNE**, Lavras , v. 20, n. 4, p. 557-565, Dec. 2014.

OLOFSSON, K.; HOLMGREN, J.; OLSSON, H. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. **Remote Sensing**, v. 6. p. 4323 - 4344, 2014.

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.

REZENDE, F. A. V. S. ; ALMEIDA, R. M. V. R. ; NOBRE, F. F. . Diagramas de Voronoi para a definição de áreas de abrangência de hospitais públicos no Município do Rio de Janeiro. **Cadernos de Saúde Pública (FIOCRUZ)** , v. 16, p. 467-475, 2000.

RUTZINGER, M.; PRATIHAST, A.; OUDE ELBERINK, S.; VOSSELMAN, G. Detection and modelling of 3d trees from mobile laser scanning data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Vol. XXXVIII, Part 5, p. 520-525. 2010.

SAMET, H. Connected component labeling using quadtrees. **Journal of the ACM**, v. 28(3), p. 487– 501, 1981.

SIMONSE, M., ASCHOFF, T., SPIECKER, H., THIES, M., 2003: Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial *LASER scanning*. **Proceedings of the ScandLASER Scientific Workshop on Airborne LASER Scanning of Forests**, Umeå/Sweden, p. 251- 257, 2013.

SCHILLING, A.; SCHMIDT, A.; MAAS, H –G. Tree Detection and Diameter Estimation in Terrestrial *Laser Scanner Point Clouds*. **16th Computer Vision Winter Workshop, 2011**. Mitterberg, Austria, 2011.

SCHILLING, A.; MAAS, H –G. Automatic reconstruction of skeletal structures from TLS forest scenes. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. II-5,p. 321-328, 2014a.

SCHILLING, A.; MAAS, H –G. Automatic r; LINGNAU, C. Tree detection by row recovery on *Eucalyptus* spp. Plantations from TLS data. **EARSeL 34th Symposium Proceedings**, p. 6.27 -6.35, 2014b.

SHAPIRO, L.; STOCKMAN, G. **Computer Vision**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 580 p, 2001.

WOODCOCK, C.E.; COLLINS, J.B.; GOPAL, S.; JAKABHAZY, V.D.; LI, X.; MACOMBER, S.; RYHERD, S.; HARWARD, V.J.; LEVITAN, J.; WU, Y.; WARBINGTON, R. Mapping forest vegetation using Landsat TM imagery and a canopy reflectance model. **Remote Sensing of Environment**, v.50, n.3, p.240- 254, 1994.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Varredura a *LASER* aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Forestalis (IPEF)**, v. 36, p. 295-306, 2008.

CAPÍTULO 4

DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM ÁRVORES DE *Pinus taeda* L. POR MEIO DE DADOS LIDAR TERRESTRE E AEROTRANSPORTADO

RESUMO

A determinação de variáveis dendrométricas é uma das utilizações da tecnologia *LIDAR* em florestas. Assim, o objetivo deste capítulo foi comparar os valores obtidos de altura total, DAP e volume, em uma parcela de *Pinus taeda*, a partir das nuvens de pontos ALS e TLS com os dados de campo. Como não foi possível o abate das árvores para obtenção da altura com trena e o volume pela cubagem, foram ajustados modelos hipsométrico e volumétricos com os dados de DAP mensurados em campo, os quais foram utilizados como parâmetro de comparação. A altura foi obtida nos dados ALS por meio do MDSn enquanto que o diâmetro, foi obtido utilizando um modelo hipsométrico invertido em o DAP foi estimado baseado na altura. Nos dados TLS, primeiramente foi realizada a filtragem para a eliminação de *outliers*, depois determinada a altura que consiste na subtração da cota mínima na cota máxima e o DAP foi obtido por meio do algoritmo do ajuste da circunferência ótima. Os volumes, tanto para os dados ALS como para TLS foram obtidos utilizando o modelo volumétrico ajustado para os dados de campo. Os modelos hipsométricos e volumétricos ajustados tiveram R^2_{aj} acima de 0,90 e $Syx\%$ abaixo de 5. Os resultados demonstraram uma subestimativa das variáveis dendrométricas a partir dos dados ALS e superestimativa com o uso dos dados TLS. Os erros podem estar atrelados ao MDT, e a presença de *outliers* na nuvem de pontos. Comparando as médias pelo teste de Dunnett a um nível de

significância de 5%, a altura total foi estatisticamente diferente entre os dados ALS e os dados de campo e os dados TLS se mostraram diferentes estatisticamente para volume e DAP (comparado aos dados campo). Os dados TLS reconstroem de maneira mais fiel as peculiaridades dos troncos das árvores. Outros estudos envolvendo dados de cubagem e altura obtida com a trena em árvores derrubadas devem ser realizados.

Palavras-chave: Modelagem hipsometrica, volumetria, processamento da nuvem de pontos.

CHAPTER 4

***Pinus taeda* L TREE DENDROMETRIC VARIABLES DETERMINATION THROUGH TERRESTRIAL AND AIRBORNE LIDAR DATA**

ABSTRACT

The determination of dendrometric variables is the main use of the LIDAR technology in forests. Thus, this chapter's aim was to compare the total height, DBH and volume values obtained in a plot of *Pinus taeda* trees through the ALS and TLS technologies with field data. As the felling wasn't possible for the trees height measurement with a measurement tape and for the volume calculation through cubing, that information was obtained by comparison using hypsometric and volumetric adjusted models based on the DBH's data collected on the field. The height was attained from the ALS data though CHM while the DAP though the inverted hypsometric model based on the height. In the TLS data, a filter was applied initially to eliminate the outliers, after that the height was determined by the minimum quote subtraction from the maximum quote and the DAP obtained through the optimum circumference adjustment algorithm. The volumes for the ALS as for the TLS were obtained using the adjusted volumetric model applied to the data collected on the field. The hypsometric and volumetric adjusted models had a R^2_{aj} over 0,90 and a S_{yx} below 5 %. The results demonstrated an underestimation on the dendrometric variables by the ALS and an overestimation by the TLS. The errors could be linked to the DTM and to the outliers presence in the points cloud. Comparing the averages to a 5% probability through the Dunnett test, the total height was statistically different between ALS data and the field measurements and TLS data showed statistically different for superior for the volume and DBH

(comparing with the field data). The TLS data rebuild the tree trunks peculiarities in a more reliable way. Other studies involving cubing data and height measurement with a measurement tape on felled trees should be done.

Key-words: Hypsometric modeling, volumetric, points cloud processing.

1. INTRODUÇÃO

O inventário e o manejo florestal requerem a medição de parâmetros que descrevam a geometria das árvores. Nos casos mais simples, esses parâmetros se limitam à altura e ao diâmetro à altura do peito (DAP). Em alguns casos, outros parâmetros são necessários, como diâmetros em diferentes alturas para a cubagem da árvore. A medição destas variáveis, por meio de métodos convencionais é inviável sem a derrubada da árvore (BIENERT *et al.* 2006).

Com o uso crescente de novas tecnologias no setor florestal, faz-se necessário otimizar o processo de quantificação e monitoramento do plantio florestal que atualmente é feito através de sutas e/ou fitas e hipsômetros, demandando grande tempo e mão-de-obra para coleta dos dados em campo.

Por meio dos dados *LIDAR*, seja o terrestre ou o aerotransportado, é possível obter com rapidez dados tridimensionais das florestas, e por meio processamento desta nuvem de pontos (com coordenadas cartesianas) é possível o conhecimento da estrutura florestal com a extração de variáveis dendrométricas e morfométricas com elevada precisão, comparadas com os métodos tradicionais de mensuração florestal.

No Brasil, grande parte dos estudos com o ALS estão focados na obtenção da altura total, DAP, volume e número de árvores, em plantios de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. por meio de modelos de regressão linear cuja variável de entrada muitas vezes é a altura das árvores, obtida pelos modelos digitais (ZANDONÁ *et al.*, 2008; GIONGO *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2011; PEINHOPF, 2012; SILVA *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2014a; OLIVEIRA *et al.*, 2014b). Já com o TLS, os estudos na área florestal são na extração de variáveis dendrométricas por meio de algoritmos que extraiam o DAP e diâmetro a diferentes alturas, alturas e técnicas de modelagem tridimensional para extração do volume por toras e volume total das árvores

(LINGNAU *et al.*, 2008; SILVA, 2011; BUCK *et al.*, 2012; MARTINS NETO *et al.*, 2013a; SILVA *et al.*, 2013; BUCK *et al.*, 2014a; MARTINS NETO *et al.*, 2015).

Todos estes estudos obtiveram resultados muito promissores na obtenção das variáveis dendrométricas, mostrando a sua aplicabilidade na área florestal, principalmente pela gama de benefícios em fazer a análise em ambiente computacional pois diminui os erros e o cansaço da equipe devido a suscetíveis idas ao campo, e pela precisão na obtenção e variáveis de difíceis obtenção.

Dado o exposto, o objetivo deste capítulo foi o de obter variáveis dendrométricas DAP, altura total e volume, em árvores de *Pinus taeda* identificadas e isoladas no capítulo 3, comparando os resultados entre o processamento das nuvens de pontos ALS e TLS com o inventário florestal tradicional em campo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. INVENTÁRIO FLORESTAL TRADICIONAL

A alocação da parcela e aquisição de variáveis dendrométricas DAP e Altura total está explicada no capítulo 1, subitem 3.2.2.

2.1.1. Análise de Regressão

Como não foi possível realizar o corte das árvores para obtenção da altura total e realizar a cubagem para obtenção do volume, foram utilizados os dados do inventário florestal contínuo da empresa do talhão em estudo para a realização do ajuste de modelos e obtenção da altura total e do volume.

Primeiramente foi verificada a normalidade dos dados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, caso estes não possuam distribuição normal, será aplicada transformação para

que seja verificada a normalidade. O teste foi realizado no *software ACTION* para Excel®. Posteriormente foram ajustados os seguintes modelos hipsométricos e volumétricos amplamente utilizados para *Pinus taeda* para a parcela do estudo (Tabela 1 e Tabela 2). Todos os critérios utilizam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 1 – Modelos Hipsométricos Ajustados.

Equação	Modelo	Autor
1	$Ln(h) = \beta_0 + \beta_1 * Ln(d) + \varepsilon_i$	Swofford
2	$Ln(h) = \beta_0 + \beta_1/d + \varepsilon_i$	Curtis
3	$h = \beta_0 + \beta_1 * Ln(d) + \varepsilon_i$	Henriksen
4	$h = \beta_0 + \beta_1 * d + \beta_2 * d^2 + \varepsilon_i$	Parábola
5	$h = \beta_0 + \beta_1 * d + \varepsilon_i$	Reta

*Onde: Em que: h – altura total (m); d – diâmetro à altura do peito (cm); ln – Logaritmo natural; β_n – coeficientes a serem ajustados; ε_i – erro inerente a estimativa.

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 2 – Modelos Volumétricos Ajustados.

Equação	Modelo	Autor
1	$v = \beta_0 + \beta_1 * d^2 h + \varepsilon_i$	Spurr (1)
2	$v = \beta_0 + \beta_1 * d + \beta_2 * d^2 + \varepsilon_i$	Hohenadl - Krenn
3	$v = \beta_0 + \beta_1 * d + \beta_2 * d^2 + \beta_3 * (dh^2)$ + $\beta_4 * (d^2 h) + \varepsilon_i$	Meyer
4	$lnv = \beta_0 + \beta_1 * ln(d^2 h) + \varepsilon_i$	Spurr (2)
5	$lnv = \beta_0 + \beta_1 * lnd + \beta_2 * lnhe_i$	Schumacher-Hall

*Onde: Em que: v – volume (m^3); h – altura total (m); d – diâmetro à altura do peito (cm); ln – Logaritmo natural; β_n – coeficientes a serem ajustados; ε_i – erro inerente a estimativa.

Fonte: produção do próprio autor.

2.1.1.1. Critérios de Seleção dos Modelos Matemáticos

Os modelos foram avaliados quanto ao desempenho nas seguintes estatísticas de precisão: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj} – equação 1), erro padrão da estimativa relativo ($Syx\%$ - equação 2 e 3), valor crítico para a distribuição F de Snedecor (equação 4) e análise gráfica dos resíduos (equação 5). Para os modelos transformados matematicamente foi aplicado o Índice de Meyer (equação 6) a fim de corrigir a discrepância logarítmica (SCHIKOWSKI *et al.*, 2014).

$$R^2_{aj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) * \frac{SQ_{resíduos}}{SQ_{total}} \quad \text{eq. 1}$$

$$Syx = \sqrt{\frac{SQ_{resíduos}}{n-p}} \quad \text{eq. 2}$$

$$Syx\% = \frac{Syx}{\bar{Y}} * 100 \quad \text{eq. 3}$$

$$F = \frac{QM_{reg}}{QM_{resíduo}} \quad \text{eq. 4}$$

$$e\% = \left(\frac{Y_{estimado} - Y_{obeservado}}{Y_{obeservado}} \right) * 100 \quad \text{eq. 5}$$

$$FM = e^{0.5 * s_{yx}^2} \quad \text{eq. 6}$$

Em que:

R^2_{aj} = Coeficiente de Determinação Ajustado;

n = Número de Observações;

p = Número de parâmetros;

$SQ_{resíduos}$ = Soma dos Quadrados dos Resíduos;

SQ_{total} = Soma dos Quadrados Total;

Syx = Erro Padrão da Estimativa;

$Syx\%$ = Erro Padrão da Estimativa Porcentual;

\bar{Y} = Média das variáveis observadas;
F = Valor Crítico para a distribuição de F de Snedecor;
 QM_{reg} = Quadrado Médio da Regressão;
 $QM_{resíduo}$ = Quadrado Médio dos Resíduos;
 FM = Fator de Meyer;
 e = Exponencial.

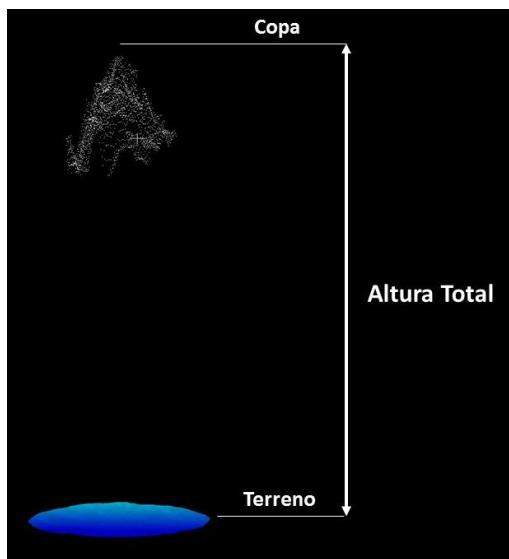
O modelo hipsométrico e volumétrico foram selecionados considerando - se os seguintes critérios: maior R^2_{aj} (Coeficiente de determinação ajustado), menor erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx\%}$) e coeficiente de variação (CV) e maior valor crítico para a distribuição F. Também foi analisada a distribuição dos resíduos, com o objetivo de verificar se o modelo selecionado apresentava alguma tendência na estimativa da variável dependente volume.

Com os valores de DAP das árvores em campo, foi estimada a altura e o volume das árvores presentes na parcela, as quais servirão como verdade de campo em comparação com as variáveis dendrométricas obtidas pelo ALS e TLS.

2.2. DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTICAS NOS DADOS ALS

A variável altura total foi utilizada para estimar as variáveis DAP e volume. Com as árvores isoladas, por meio do *clip* de suas copas identificadas automaticamente, a altura foi obtida por meio do MDSn, que é a diferença entre o ponto mais alto (copia) e o terreno (Figura 1).

Figura 1 – Obtenção das alturas na nuvem ALS.



Fonte: produção do próprio autor.

Para estimativa do DAP a partir das informações da altura total obtida no MDSn foi aplicado o modelo parabólico para relação hipsométrica (Equação 7), tomado na sua forma inversa testado por Oliveira *et al.*, 2011 e Peinhopf, 2012 que verificou um melhor ajuste para este método em relação aos demais (PEINHOPF, 2012) onde o DAP de referência utilizado foi aquele mensurado em campo com a suta.

$$DAP = \beta_0 + \beta_1 * h + \beta_2 * h^2 + \varepsilon_i \quad \text{eq. 7}$$

Onde:

DAP : Diâmetro a altura do peito (cm);

β_0 : Coeficientes a serem ajustados;

h : Altura Total (m).

ε_i : Erro inerente a estimativa.

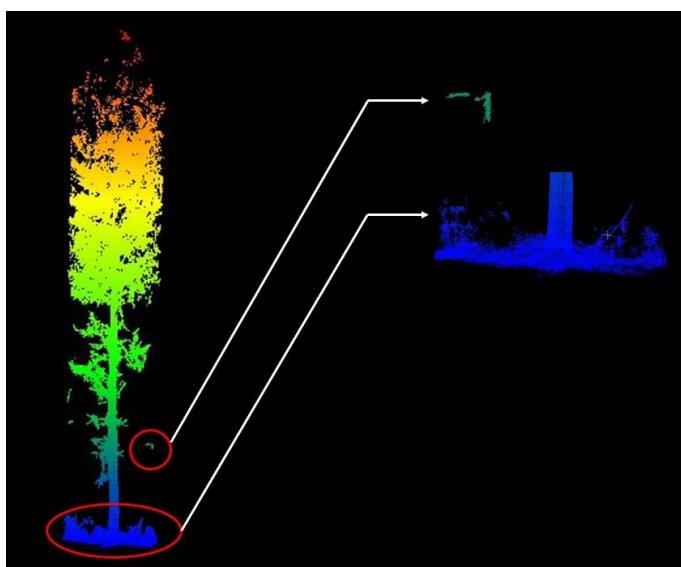
Devido a defasagem de 1 ano e meio entre o voo e a coleta dos dados em campo, foi adicionado ao valor da altura o valor de 1,285 m, correspondente ao incremento em altura neste período. O incremento médio anual foi obtido pelo inventário florestal contínuo da empresa.

A variável volume total foi estimada por meio do modelo selecionado no subitem 2.1.1, em que a altura e o DAP utilizados como dados entrada serão os obtidos por meio do MDSn.

2.3. DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTICAS NOS DADOS TLS

Antes de prosseguir com a determinação das variáveis dendrométricas, as árvores detectadas e filtradas passaram por um processo de filtragem com o objetivo de eliminar *outliers*, como por exemplo sub-bosque, pontos de ruído, galhos entre outros que não fazem parte do tronco da árvore (Figura 2).

Figura 2 – Árvore isolada na nuvem TLS com a representação de outliers.



Fonte: produção do próprio autor.

A filtragem automática realizada por meio de algoritmos desenvolvidos e implementados em ambiente VBA. A rotina de filtragem aplicada neste estudo tem como base três procedimentos: Ajuste da Circunferência Ótima, Seleção de Pontos e Padrão.

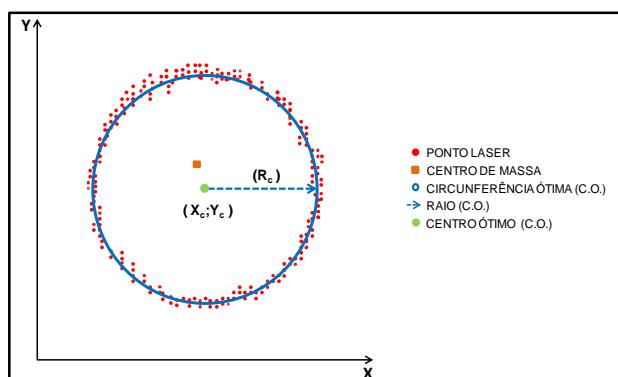
O ajuste de uma circunferência à nuvem de pontos, correspondente a determinada seção do tronco da árvore, foi proposto por autores que utilizaram o método de mínimos quadrados (ASCHOFF *et al.*, 2004, LIANG *et al.*, 2008, BIERNET *et al.*, 2006, BIERNET *et al.*, 2007, LITKEY *et al.*, 2008., SILVA, 2011, BUCK, 2012., BUCK *et al.*, 2014b) buscando obter a variável diâmetro das árvores.

Na aplicação do método com o objetivo do isolamento do tronco depara-se com uma abordagem diferente para os resultados, onde as variáveis de maior interesse são a obtenção

dos valores das coordenadas do centro ($X_c;Y_c$) e o respectivo raio (R_c) da circunferência ótima (C.O).

Segundo SILVA (2011) e BUCK (2012) o centro ótimo é aquele em que a variância ou o desvio padrão das distâncias entre o centro da seção transversal e todos os pontos possuem o valor mínimo. O autor propõe que este enunciado seja resolvido como um problema de pesquisa operacional utilizando a ferramenta SOLVER do pacote Excel. A função objetivo (F.O.) seria a de minimizar o desvio padrão das distâncias euclidianas entre todo os pontos da fatia e o ponto central estabelecido como referência do centro da circunferência a ser ajustada (centro de massa) (Figura 3).

Figura 3 – Método do Ajuste da Circunferência Ótima



Fonte: Buck., 2012.

De acordo com a ilustração é possível observar o ponto de partida (centro de massa) para o ajuste da circunferência. Aplicando a ferramenta SOLVER utilizando a função objetivo proposta por Silva (2011) é realizado o ajuste de uma circunferência ao conjunto de pontos da fatia e são encontrados os valores das coordenadas do centro ($X_c;Y_c$) e raio da circunferência (R_c).

Após este procedimento, é realizada a Seleção de Pontos que consiste em buscar os pontos *LASER* próximos ao perímetro da circunferência ajustada. (KIRÁLY & BROLLY, 2010; SILVA, 2011). Com o centro ótimo e o raio da circunferência são calculadas as coordenadas de pontos sob a curva, utilizando transporte de coordenadas (Equação 8).

$$\begin{aligned} X_i &= X_c + R_c * \operatorname{sen}(\alpha) \\ Y_i &= Y_c + R_c * \operatorname{cos}(\alpha) \end{aligned} \quad \text{eq. 8}$$

Onde:

X_i = coordenada X do ponto i sob a circunferência ajustada

Y_i = coordenada Y do ponto i sob a circunferência ajustada

X_c = coordenada X do centro da circunferência

Y_c = coordenada Y do centro da circunferência

R_c = raio da circunferência

α = ângulo entre pontos da circunferência

A aplicação destas funções trigonométricas em intervalos angulares pré- definidos resulta em pares de coordenadas que dão origem aos pontos de busca. Para cada ponto de busca gerado é iniciada a procura pelo ponto laser mais próximo e gravado suas respectivas coordenadas. A quantidade e o ordenamento dos pontos *LASER* se dá pelo valor de ângulo que se utiliza, neste caso o ângulo inicial foi acrescido de 1 em 1 grau, totalizando 360 pontos *LASER* selecionados por seção transversal (Figura 4) (SILVA, 2011; BUCK *et al.*, 2014b).

O algoritmo calcula as coordenadas de pontos da circunferência, e busca o ponto *LASER* mais próximo, utilizando um algoritmo de busca do vizinho mais próximo.

Figura 4 – Procedimento Seleção de Pontos.

Para $j = 1$ até n_{Pt} faça:

Calcular: coordenadas X_j e Y_j do ponto de busca:

$$X_j = X_c(f-1) + R_c(f-1) * \text{sen}(\alpha)$$

$$Y_j = Y_c(f-1) + R_c(f-1) * \cos(\alpha)$$

Selecionar: ponto *laser* mais próximo

$$D_{min} = 100$$

Para $l = 1$ até número de registros faça:

$$\text{Distância euclidiana} = \sqrt{(X_l - X_j)^2 + (Y_l - Y_j)^2}$$

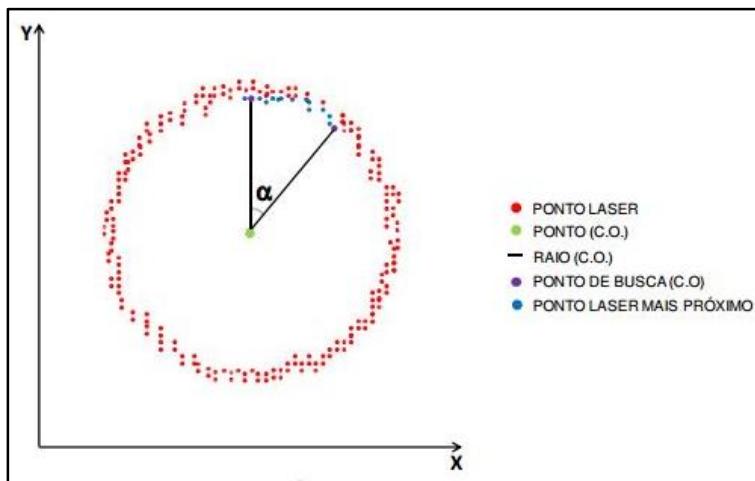
Se Distância euclidiana < D_{min} **Então:**

$$D_{min} = \text{Distância euclidiana}$$

Próximo l

Gravar: Coordenadas (X_j, Y_j, Z_j) do Ponto *Laser* selecionado

Próximo j



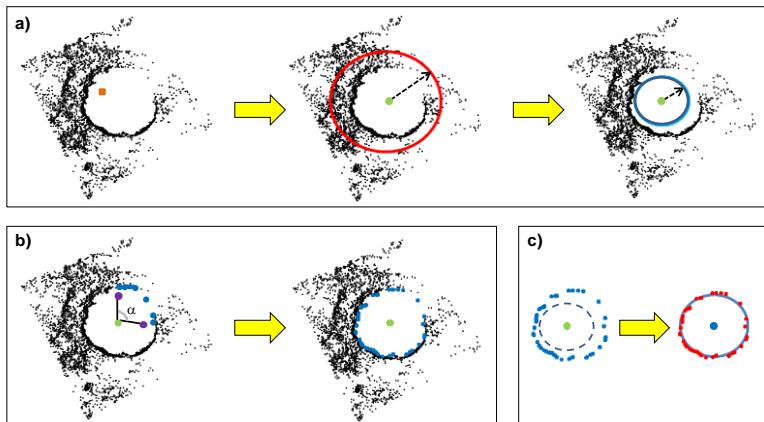
Fonte: Buck., 2012.

O procedimento Padrão é aplicado na primeira seção transversal, denominada de seção 0. As coordenadas aproximadas do centro da seção 0 devem adotar como valor inicial a média aritmética dos pontos nos respectivos eixos X e

Y. Posteriormente as coordenadas aproximadas do centro da circunferência (X_c ; Y_c) devem assumir os valores do centro da circunferência da fatia anterior ($X_{c(f-1)}$; $Y_{c(f-1)}$) (BUCK *et al.*, 2014b).

A presença de pontos de solo e sub-bosque pode causar problemas no ajuste da Circunferência Ótima, gerando valores tendenciosos para a média das coordenadas X e Y. Assim, para a primeira fatia, utiliza-se metade do raio da circunferência ajustada, garantindo assim que os pontos de busca não estejam fora do perímetro do tronco da árvore, e em seguida o procedimento “Seleção de Pontos” é aplicado (BUCK *et al.*, 2014b) (Figura 5).

Figura 5 - Procedimento padrão (seção transversal = 0): (a) Primeira aplicação do procedimento Circunferência Ótima, (b) aplicação do procedimento Seleção de Pontos, (c) segunda aplicação do procedimento Circunferência Ótima



Fonte: Buck *et al.*, 2014b.

O filtro utilizado para eliminação dos pontos que não pertencem ao tronco das árvores foi desenvolvido por Buck, 2012 e Buck *et al.*, (2014b) e é denominado distância máxima (Figura 6).

Figura 6 - Rotina do filtro Seções Transversais.

PROCEDIMENTO: PADRÃO (<i>seção transversal=0</i>) <i>'Procedimento com a seção transversal > 0</i> $X_c = X_{c(f-1)}$; $Y_c = Y_{c(f-1)}$; $R_c = R_{c(f-1)}$ Acionar: REGIÃO DE BUSCA PROCEDIMENTO: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS: <i>'Calcular coordenadas X_j e Y_j da circunferência a cada 1°</i> $X_j = X_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{sen}(\alpha)$ $Y_j = Y_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{cos}(\alpha)$ Selecionar: Ponto mais próximo do ponto de busca PROCEDIMENTO: C.O <i>'Recalcando o centro ótimo com os pontos selecionados</i> PROCEDIMENTO: EXCLUSÃO DE PONTOS <i>'Excluindo pontos com distância superior ao raio + 2 desvios</i> $d = \text{desvio padrão da distância euclidiana}$ Para $r = 1$ até o último registro <i>Se Distância euclidiana $< R_c + 2d$ faça:</i> <i>Gravação das coordenadas X_s e Y_s</i> Próximo r PROCEDIMENTO: C.O <i>'Recalcando o centro ótimo com os pontos selecionados</i> Gravar: Conjunto de pontos selecionados para seção transversal > 0 : <i>Coordenadas X_s; Y_s; Z_s</i> <i>'Próxima seção transversal</i>

Fonte: Buck, 2012; Buck *et al.*, 2014b.

A rotina da filtragem inicia com a aplicação do procedimento Padrão nos dados da seção transversal da base. Para seções transversais acima da base, é acionado o procedimento Seleção de Pontos, utilizando como valor de referência o raio da seção transversal ajustada anteriormente para dar origem aos pontos de busca.

Os dados oriundos do procedimento Seleção de Pontos são gravados na memória e o procedimento Circunferência Ótima é acionado para o conjunto de pontos. Os pontos que estiverem a uma distância superior a do raio acrescido de dois desvios padrão das distâncias euclidianas serão excluídos (LITKEY *et al.*, 2008). Após a exclusão dos pontos novamente é chamado o procedimento Ajuste de Circunferência Ótima para encontrar os valores que serão utilizados no processamento da próxima seção transversal. As coordenadas são selecionadas no plano X, Y e o valor da coordenada Z é obtida de acordo com altura da seção transversal processada (X_s ; Y_s ; Z_f) (BUCK, 2012).

Após a filtragem, foi determinada a altura da árvore cuja metodologia aborda a altura total como sendo a diferença entre o ponto de maior cota Z e o ponto de cota zero determinado no momento da filtragem. Neste caso, se existir um ponto isolado (*outlier*) com cota Z fora dos padrões normais, a altura pode ser fortemente alterada em relação aos valores reais indicando problemas de filtragem (SILVA, 2011).

O DAP das árvores foi determinado empregando o método do Ajuste de Circunferência Ótima (Figura 3) e o volume total será estimado por meio do modelo selecionado no subitem 2.1.1, em que a altura e o DAP utilizados como dados entrada serão os obtidos por meio dos métodos supracitados.

2.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS

Para fazer a comparação, foi utilizada as mesmas árvores identificadas automaticamente tanto na nuvem ALS quanto na TLS para que houvesse um número igual de amostras em todas as metodologias analisadas e realização dos testes estatísticos. Assim, das 53 árvores presentes na parcela, 32 foram corretamente identificadas pelos métodos automatizados em ambas as tecnologias, utilizando como parâmetro as árvores contadas em campo, sendo este o valor de amostras.

Além das estatísticas descritivas, as medições foram avaliadas por meio um delineamento experimental inteiramente casualizado em que as variáveis dendrométricas obtidas pelos dados de campo foram as testemunhas, e os outros dois tratamentos constituídos pelas variáveis obtidas pelo processamento das nuvens ALS e TLS respectivamente, sendo as árvores as repetições.

Primeiramente foi verificada a homogeneidade das variâncias por meio do teste de Bartlett. Caso as variâncias fossem homogêneas, e realizada a ANOVA (análise de variância) e caso haja diferença significativa (ou seja, a hipótese de que não há diferenças entre as médias seja rejeitada) foi realizado o teste de médias de Dunnett, com um nível de probabilidade de 5%, no *software ACTION* para Excel. Este teste foi escolhido pois realiza comparações de vários tratamentos com relação a um controle. Uma vantagem do uso de um método de comparações múltiplas com um tratamento controle é a redução do número de comparações simultâneas executadas, pois apenas consideram-se os pares em que se comparam o tratamento padrão com os demais (BROCH, 2013).

O intuito desta avaliação é verificar se há diferenças estatísticas entre os diferentes métodos empregados para obter as variáveis dendrométricas DAP, altura total e volume.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. AJUSTE DOS MODELOS HIPSOMÉTRICOS E VOLUMÉTRICOS

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas dos dados utilizados nos ajustes, tendo a altura total com um valor mínimo de 14,86 m e máximo de 18,76 m, com o menor coeficiente de variação dentre as variáveis, 5,78%. O DAP teve um valor mínimo de 18,62 cm e máximo de 27,06 cm, com coeficiente de variação no valor de 9,09%. Já o volume, variou de 0,185 m³ no

valor mínimo e 0,485 m³ no valor máximo, com o maior coeficiente de variação dentre as variáveis, 23,46%.

Tabela 3 – Estatística descritiva para a Altura Total, DAP e Volume utilizados no ajuste dos modelos hipsometricos e volumetricos.

Estatística	Altura (m)	DAP (cm)	Volume (m ³)
Mínimo	14,86	18,62	0,185
Médio	17,04	23,10	0,334
Máximo	18,76	27,06	0,485
Desvio Padrão	0,98	2,10	0,078
Variância	0,97	4,40	0,006
Coeficiente de Variação	5,78%	9,09%	23,46%
Amplitude	3,90	8,44	0,300

Fonte: produção do próprio autor.

Os dados apresentaram uma distribuição normal, por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov a um nível de probabilidade de 95%, assim foi possível o ajuste dos modelos de regressão.

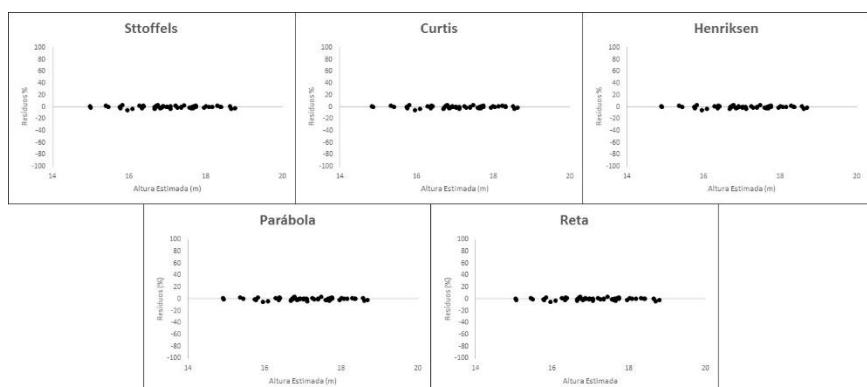
Dentre os modelos hipsométricos ajustados, todos obtiveram um R²aj acima de 0,90, todavia os modelos logarítmicos (Stoffels e Curtis) apresentaram um alto erro padrão da estimativa Syx% (10,89% para ambos). Como a maior parte dos modelos obtiveram um valor de F muito parecido, o critério de escolha dos modelos foi baseado no menor Syx% e um melhor ajuste dos resíduos sendo escolhido o modelo de Henriksen. As estatísticas e parâmetros dos modelos ajustados podem ser visualizadas na Tabela 4 e a distribuição dos resíduos na Figura 7.

Tabela 4 – Parâmetros e estatísticas dos modelos hipsométricos ajustados.

Modelo	β_0	β_1	β_2	R²aj	Syx%	F
Sttoffels	0,9435	0,6029		0,902	10,89	461,46
Curtis	3,4271	-13,5807		0,901	10,89	458,00
Henriksen	-14,8033	10,1569		0,902	1,804	453,67
Parábola	1,7382	0,8860	-0,0095	0,901	1,819	228,07
Reta	6,7524	0,4456		0,900	1,825	451,59

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 7 – Distribuição dos resíduos para os modelos hipsométricos ajustados.



Fonte: produção do próprio autor.

Os modelos volumétricos ajustados apresentaram comportamentos muito similares, com um elevado coeficiente de determinação ajustado (acima de 0,98), erro padrão da estimativa por volta de 2% e alguns com o valor de F muito similar. Com isso, o critério de seleção foi baseado no menor erro padrão da estimativa, elevado valor de F e melhor distribuição dos resíduos, no qual o modelo de Spurr (1) se sobressaiu. As estatísticos e parâmetros dos modelos

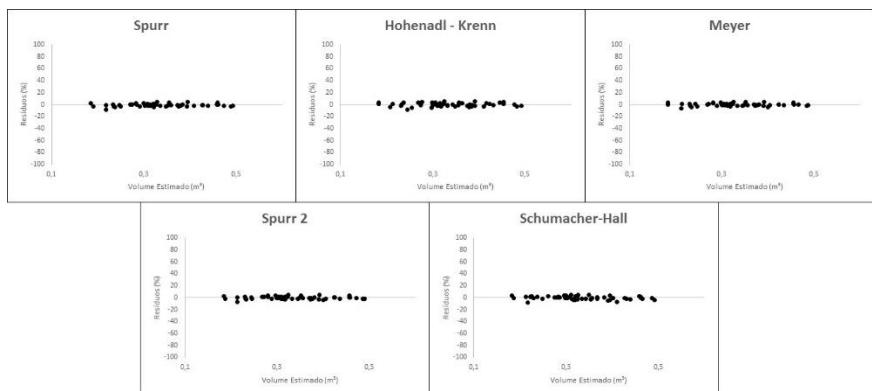
volumétricos ajustados são apresentados na Tabela % e a distribuição dos resíduos na Figura 8.

Tabela 5 – Parâmetros e estatísticas dos modelos volumétricos ajustados.

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	R ^{2aj}	Syx%	F
Spurr (1)	-0,003	-0,0003				0,991	2,22	5487,07
Hohenadl - Krenn	-0,03	-0,006	0,0009			0,985	2,90	1669,05
Meyer	-0,44	0,057	-0,002	-0,00006	0,00013	0,990	2,34	1239,33
Spurr (2)	-10,36	1,014				0,990	2,31	5363,54
Schumacher - Hall	-11,30	1,525	1,904			0,996	2,88	6614,38

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 8 – Distribuição dos resíduos para os modelos volumétricos ajustados.



Fonte: produção do próprio autor.

3.2. DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL ALTURA TOTAL

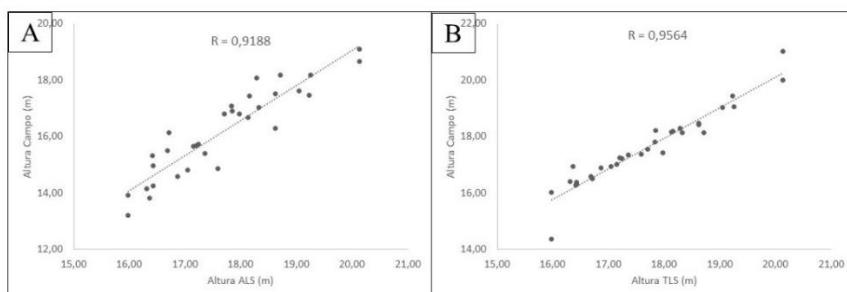
A determinação da altura total tanto pelo ALS quanto pelo TLS subestimaram o valor obtido em campo. O valor médio em campo, aqui considerado os estimados pela equação hipsométrica em que os valores de entrada foram os DAP mensurados em campo, foi de 17,68 m contra 16,18 m obtido pelo ALS e 17,60 m pelo TLS. O maior coeficiente de variação nas alturas foi obtido por meio dos dados ALS (9,56%). As estatísticas descritivas para a altura total podem ser vistas na Tabela 6. Na Figura 9 é possível ver o ajuste da linha de tendência, indicando uma forte correlação entre as alturas obtidas em campo e as alturas com o ALS e o TLS. O maior quantidade de valores acima da linha de tendência, indica a subestimativa na altura.

Tabela 6 – Estatísticas descritiva para a variável altura total.

Estatística	Altura Campo (m)	Altura ALS (m)	Altura TLS (m)
Mínimo	15,97	13,20	14,35
Médio	17,68	16,18	17,60
Máximo	20,12	19,11	21,02
Desvio Padrão	1,15	1,55	1,30
Variância	1,32	2,39	1,69
Coeficiente de Variação	6,49%	9,56%	7,39%
Amplitude	4,15	5,91	6,67

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 9 – Ajuste da linha de tendência entre A) Altura total e Altura ALS; B) Altura total e Altura TLS.



Fonte: produção do próprio autor.

A subestimativa da altura é uma tendência observada por vários autores. Em dados ALS, essa subestimativa foi encontrada NÆSSET (1997); NÆSSET., (2002); ZANDONÁ *et al.*, (2008); HEURICH & THOMA, (2008); OLIVEIRA *et al.*, (2014a). Estes autores atrelam o erro da altura à qualidade dos modelos digitais gerados devido a menor quantidade de pulsos *LASER* que representem o solo devido a densidade da vegetação. Assim, quanto menor o número de pulsos que atingem o solo,

menor será a qualidade dos modelos digitais gerados. Como a altura é obtida diretamente a partir dos modelos digitais, a sua qualidade afeta o valor desta variável.

Neste estudo, no capítulo 2, foi possível perceber que o erro médio do MDT obtido pelo melhor método de filtragem escolhido (*ATIN*) subestimou em média 0,97 m comparado ao modelo paramétrico obtido com a estação total. Assim, se há erros no MDT de subestimativas, consequentemente a variável altura total também será subestimada. Peinhopf *et al.*, (2014) comenta que quanto maior a idade do plantio, mais difícil é de se obter a variável altura. O erro na subestimativa foi de 8,48%, entretanto é importante destacar que para resultados mais precisos e avaliar a real magnitude dos erros faz – se necessária a medição com as árvores derrubadas em campo com trena.

A subestimação da altura total tem sido relatada por diversos autores que utilizaram TLS para a determinação dessa variável. A subestimativa foi atribuída à ausência de pontos no ápice da árvore, ocasionado pela alta densidade de acículas na copa e ao posicionamento do *LASER* em relação à altura total da árvore (MAAS *et al.*, 2008; LINGNAU *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2011; MARTINS NETO *et al.*, 2013a; MENGESHA *et al.*, 2015) impedindo que existissem pulsos *LASER* no ponto mais alto da árvore. Assim na subtração entre as cotas máxima e mínim da árvore, o valor da altura será menor que o mensurado de maneira direta.

Comparando com a altura pelo ALS, o TLS subestimou menos a altura (em média 0,45%). O menor erro pode ser explicado pelo fato de a altura obtida pelo TLS não precisar de um MDT para ser obtida, e sim mensurada diretamente entre a diferença de cotas entre os pontos máximos e mínimos na nuvem de pontos. De acordo com Silva, 2011 se existir um ponto isolado (*outlier*) com cota Z fora dos padrões normais, a altura pode ser fortemente alterada em relação aos valores paramétricos indicando problemas de filtragem (SILVA, 2011).

3.3. DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL DAP

A equação ajustada para estimar o DAP por meio dos dados ALS foi $DAP = 53,4155 - 5,3105H + 0,2164H^2$, com um R^2_{aj} de 0,852 e Syx% de 4,44.

As estatísticas descritivas entre os diâmetros a altura do peito obtidos pela mensuração em campo, pelo modelo hipsométrico de regressão inverso para o ALS e pelo algoritmo ajuste de circunferência ótima nos dados TLS estão na Tabela 7. Os maiores coeficientes de variação foram observados com os DAP de campo e pelo processamento da nuvem TLS.

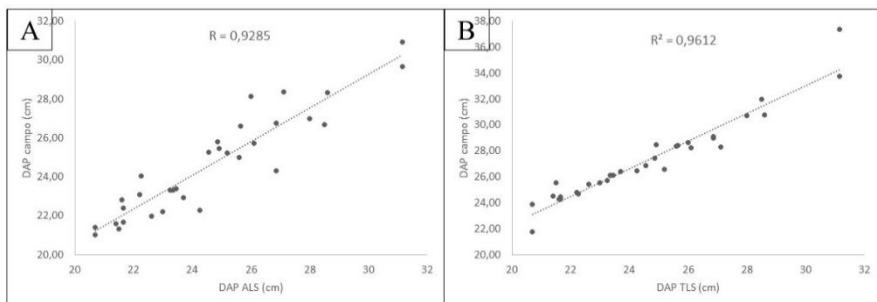
Tabela 7 – Estatísticas descritiva para a variável DAP.

Estatística	DAP Campo (cm)	DAP ALS (cm)	DAP TLS (cm)
Mínimo	20,70	21,02	21,76
Médio	24,63	24,63	27,32
Máximo	31,15	30,94	37,39
Desvio Padrão	2,85	2,65	3,16
Variância	8,13	7,00	9,96
Coeficiente de Variação	11,57%	10,74%	11,55%
Amplitude	10,45	9,92	15,63

Fonte: produção do próprio autor.

A Figura 10 demonstra o ajuste da linha de tendência para os diâmetros. É possível notar que há uma leve subestimativa nesta variável e maior dispersão dos valores comparado com os dados ALS e uma superestimativa com menor dispersão dos valores comparada com os dados TLS. Ambas tiveram uma elevada correlação, sendo maior entre o DAP mensurado em campo e o DAP por meio do TLS (0,9612 contra 0,9285 comparando DAP medido com a sutura e com o ALS).

Figura 10 – Ajuste da linha de tendência entre A) DAP e DAP ALS; B) DAP e DAP TLS.

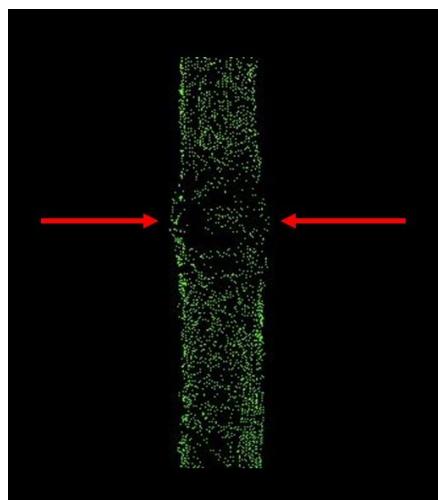


Fonte: produção do próprio autor.

Como os dados de DAP na nuvem ALS estão fortemente atrelados a determinação da altura, é esperado que uma subestimativa na variável altura acarrete em uma subestimativa na variável DAP.

De acordo alguns estudos, não há uma tendência clara na sub ou superestimativa dos DAP obtidos por meio do TLS (HOPKINSON *et al.*, 2004; BIENERT *et al.*, 2007; LINGNAU *et al.*, 2009; SILVA, 2011; MARTINS NETO *et al.*, 2013a). A superestimativa encontrada neste estudo pode ter relação com a presença de pontos de ruído na região do DAP ou pela presença de imperfeições no tronco das árvores que não são possíveis de serem detectadas pela mensuração com a sutá (Figura 11).

Figura 11 – Detalhe demonstrando imperfeição do tronco, a qual pode superestimar o DAP.



Fonte: produção do próprio autor.

Hopkinson *et al.* (2004), ajustando cilindros para obtenção da variável diâmetro à altura do peito, encontraram coeficiente de determinação $R^2= 0,85$ em florestas de *Pinus resinosa* Ait. e *Acer saccharum* Marsh. Wezyk *et al.* (2007) propôs um algoritmo para reconstrução da área transversal e obtenção de diâmetros onde encontrou resultados de coeficiente de determinação variando entre 0,94 e 0,96 para diferentes espécies de folhosas e coníferas na Polônia.

Silva (2011), ajustando circunferências para determinação do diâmetro à altura do peito de árvores de *Pinus* spp., observou resultados semelhantes ao encontrado nesta pesquisa, sendo os resíduos em média de -2,8%, oscilando entre -0,2% e -10,9%, valores obtidos no processamento de dados *LASER* comparados com fotografias das seções transversais tomadas em discos cortados do tronco da árvore.

Em um estudo com árvores individuais de *Eucaliptus* spp, Martins Neto *et al.*, (2013b) também encontrou superestimativas

dos diâmetros e explica fato das seções transversais da árvore não serem circulares. E ressaltar que os diâmetros determinados pelos métodos convecionais também possuem erros, ou seja, no uso da fita o diâmetro é calculado pela circunferência e no uso da suta calcula-se a média entre duas medidas. Assim, nenhuma destas medidas leva em consideração verdadeira forma da fatia (com todas as imperfeições que o tronco da árvore possui).

Olofsson *et al* (2014), utilizando ajuste de circunferências, encontraram erros médios variando de 12% a -21% para a estimativa de diâmetros e diferentes espécies no Sudoeste da Suécia e relataram a ocorrência de tendências à subestimação quando comparado com as medidas convencionais em campo.

Avaliando os resultados encontrados neste estudo, é possível destacar que os valores do DAP apresentam elevados valores de correlação e os resíduos (-10,92%) estão entre os valores encontrados na literatura.

3.4. DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL VOLUME

Como na equação ajustada para obter a variável volume necessitava dos valores de DAP e altura total, os problemas encontrados na obtenção destas variáveis nos dados ALS e TLS são refletidos aqui também. As estatísticas descritivas (Tabela 8) demonstram que há uma superestimativa e uma elevada variação dos volumes obtidos pelo TLS (média de 0,49091 m^3 contra 0,39948 m^3 com as mensurações em campo, e CV de 33,17%). Já o volume pelos dados ALS apresentou subestimativa tanto comparando com as mensurações de campo, quanto com as mensurações do TLS, com uma média de 0,36954 m^2 .

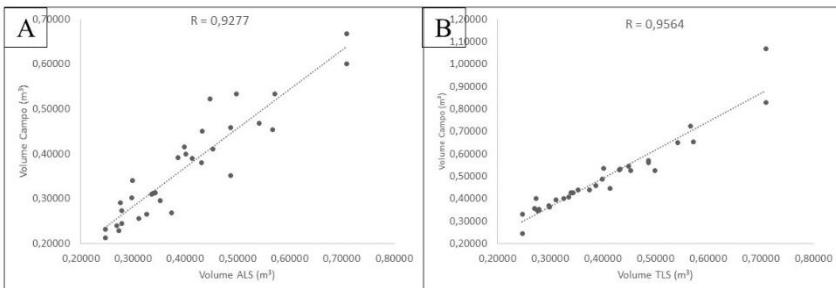
Tabela 8 – Estatísticas descritivas para a variável volume.

Estatística	Volume Campo (m ³)	Volume ALS (m ³)	Volume TLS (m ³)
Mínimo	0,24678	0,21280	0,24504
Médio	0,39948	0,36954	0,49091
Máximo	0,70976	0,66761	1,06967
Desvio Padrão	0,12379	0,11651	0,16282
Variância	0,01532	0,01358	0,02651
Coeficiente de Variação	30,99%	31,53%	33,17%
Amplitude	0,46298	0,45481	0,82462

Fonte: produção do próprio autor.

O ajuste da linha de tendência demonstra uma alta correlação entre as medições em campo e as com os dados ALS e TLS (Figura 12).

Figura 12 – Ajuste da linha de tendência entre A) Volume e Volume ALS; B) Volume e Volume TLS.



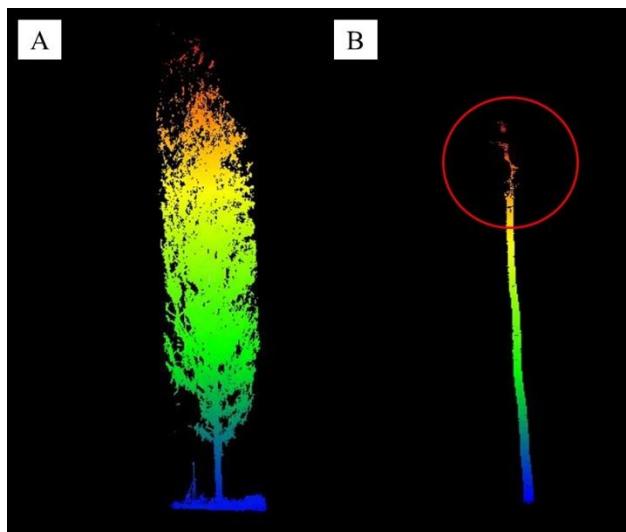
Fonte: produção do próprio autor.

De acordo com Oliveira *et al.*, (2014a) a subestimativa para o volume estimado com os dados do *LiDAR* aerotransportado, em relação aos dados do inventário florestal, pode ter sido provocada pela subestimativa das alturas nos pontos de máxima, ou seja, pixels com maior valor referindo ao topo das árvores.

Assim, em razão da altura subestimada, o volume também foi subestimado. Neste estudo, a altura das árvores obtidas pelo MDSn foi subestimada, logo o DAP, que necessita da altura para ser estimado, também foi subestimado e consequentemente o volume.

Não foi possível realizar o corte das árvores na área de estudo para realizar a cubagem e determinar seu volume rigoroso. Com isso, a ideia inicial de realizar a modelagem tridimensional da nuvem de pontos 3D com os dados *LiDAR* terrestre para estimar o volume, todavia não foi possível, pois devido à ausência de dados nas partes superior do tronco pela presença da copa, a análise mais interessante de ser realizada é por toras, como é feita na cubagem rigorosa (BUCK, 2012; BUCK *et al.*, 2014) (Figura 13).

Figura 13 – A) Árvore Inteira; B) Ausência de dados após a filtragem, dificultando a obtenção do volume total da árvore.



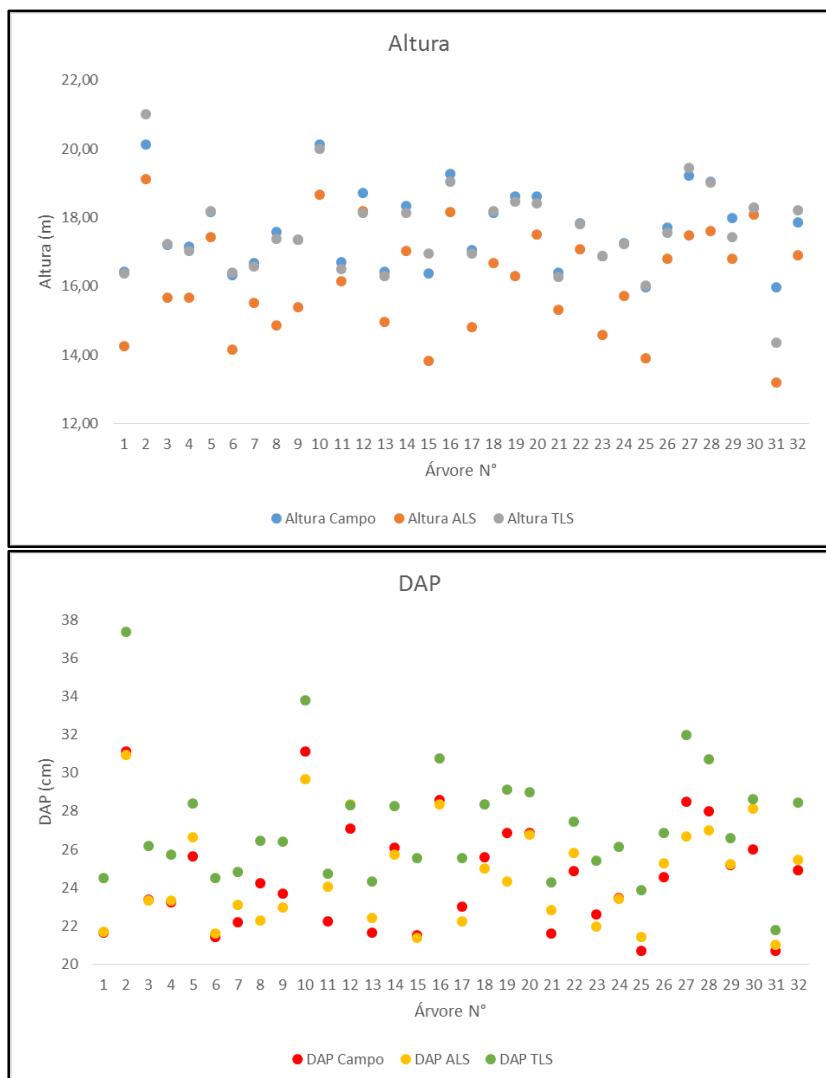
Fonte: produção do próprio autor.

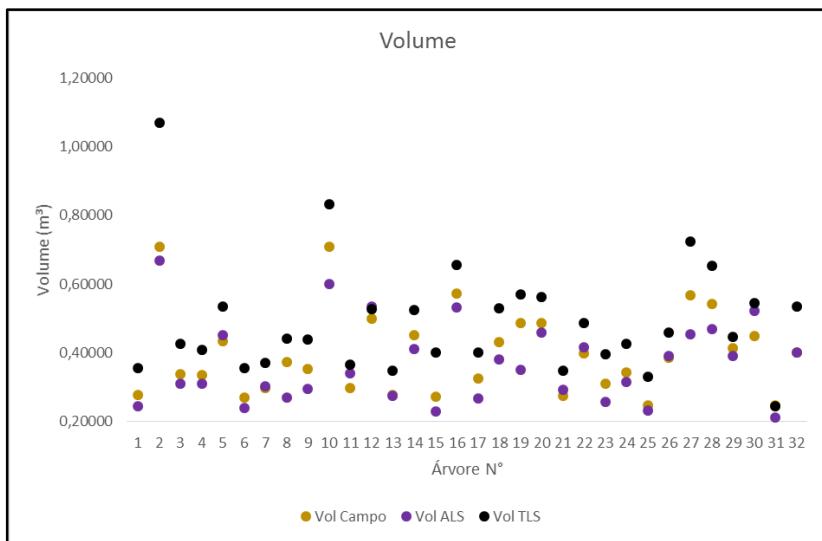
O volume foi superestimado pelos dados TLS. Utilizando as técnicas de modelagem tridimensional, Buck *et al.*, (2012) e Buck *et al.*, (2014) encontraram uma subestimativa nos volumes obtidos por esta técnica nos dados TLS nas toras mais baixas do fuste comparado com a cubagem por *Smalian*. Porém, comparando com o método do volume do Xilômetro (método paramétrico de deslocamento de água), a modelagem tridimensional não apresentou diferença constatando que o modelo tridimensional é o que mais se aproxima do volume verdadeiro das primeiras toras. Já nas porções mais altas o volume foi superestimado devido à presença de galhos e copa. Como a filtragem elimina região em que não há dados do tronco, técnicas para estimar os pontos perdidos, como a *skeletization* se fazem necessárias.

3.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS

Por meio da estatística descritiva, é possível notar que as variáveis dendrométricas obtidas pelo processamento da nuvem ALS e TLS estão muito próximas da medida em campo, com uma maior aproximação dos valores do TLS aos valores paramétricos utilizados nesta pesquisa (Figura 14)

Figura 14 – Comparação entre os valores obtidos pelo método paramétrico e processamento das nuvens ALS e TLS para as três variáveis mensuradas.





Fonte: produção do próprio autor.

Sendo um dos objetivos deste trabalho determinar para cada uma das variáveis dendrométricas a existência, ou não, de diferenças estatísticas entre métodos *LASER* e valores paramétricos obtidos pelos métodos tradicionais de campo, realizou-se o teste de *Dunnett* em delineamento inteiramente casualizado para cada uma das variáveis obtidas, em que os valores das variáveis dendrométricas obtidas em campo foram o parâmetro e as variáveis obtidas pelo processamento da nuvem ALS e TLS comparadas com este parâmetro.

O teste de Bartlett mostrou que as variâncias dos valores para as três variáveis no estudo para as 32 árvores são homogêneas, sendo possível o teste de comparação de médias.

A Tabela 9 mostra a comparação com o teste de médias de *Dunnett* a um nível de significância de $\alpha = 5\%$, em que o parâmetro de comparação (Campo) consiste nas variáveis dendrométricas obtidas com a mensuração da variável DAP em campo; ALS consiste nas variáveis dendrométricas obtidas por esta tecnologia em que a altura total foi necessária para estimar o diâmetro e o volume; e o TLS que são as variáveis

dendrométricas obtidas por meio do processamento da nuvem TLS para obter a altura total (por meio da diferença de cotas) e DAP por meio do algoritmo Ajuste de Circunferência Ótima.

Tabela 9 – Teste de *Dunnett* comparando as variáveis dendrométricas obtidas nos diferentes métodos.

Diferença entre Níveis	P-valor (Altura)	P-valor (DAP)	P-valor (Volume)
ALS - Campo	0,00004*	1	0,58354
TLS - Campo	0,95983	0,00067*	0,01604*

Médias com * diferem significativamente ao nível de significância de 5 %

Fonte: produção do próprio autor.

Quando o P-valor for menor que o nível de probabilidade, há diferença estatística entre as médias analisadas. De acordo com os resultados acima, para a variável altura, não houve diferença significativa entre as obtidas pelo modelo hipsométrico com o DAP de campo e pela diferença de cotas na nuvem de pontos TLS. Porém, as alturas obtidas pelo MDSn se mostraram diferentes estatisticamente as obtidas em campo devido a subestimativa desta variável obtida pelos dados ALS.

Para a variável DAP e Volume, os dados TLS se mostraram diferentes estatisticamente aos dados de campo, enquanto que os dados ALS não. O TLS fornece a geometria das árvores de maneira muito próxima a sua geometria original, com as tortuosidades, presenças de falhas no tronco, sapopemas, entre outras obtendo assim um diâmetro mais próximo ao diâmetro verdadeiro, devido a isso foi vista uma subestimativa nesta variável nos dados TLS. Silva (2011) e Martins Neto *et al.*, (2012) realizaram a comparação dos diâmetros obtidos com o LASER terrestre, diâmetro com sutá e diâmetro mais próximo do verdadeiro das seções transversais de *Pinus taeda* a diferentes alturas. O diâmetro verdadeiro foi considerado o obtido por meio do processamento digital de imagens das seções transversais em

que todas as reentrâncias e detalhes da casca foram considerados. Os resultados demonstraram não haver diferenças entre os valores do TLS e do processamento das imagens indicando que os pontos *LASER* conseguem reproduzir de forma muito fidedigna os troncos das árvores. Como para obter o volume foi necessário o DAP, esta variável também se mostrou superior às outras estatisticamente, não diferenciando tratamento testemunha e o ALS.

Vale ressaltar que devido aos problemas em obter os valores das variáveis altura e volume em campo, faz – se necessários estudos em que seja possível o abate das árvores para obter valores mais precisos, e assim entender melhor a magnitude dos erros e das médias obtidas.

4. CONCLUSÕES

Com o isolamento das árvores no capítulo anterior, foi possível estimar as variáveis dendrométricas nas nuvens ALS e TLS. Como não foi possível o abate das árvores, os valores paramétricos de altura e diâmetro foram estimados por meio de equações hipsométricas e volumétricas por meio de dados de inventário florestal continuo fornecidos pela empresa. Os modelos ajustados obtiveram um elevado R^2_{aj} e um baixo $Syx\%$;

A obtenção da altura das árvores de forma correta é muito importante a partir dos dados ALS, pois com a altura que o diâmetro e o volume foram estimados, devido à isso é necessário a obtenção de um MDT de boa qualidade para que os erros sejam os menores possíveis. Neste estudo houve uma tendência na subestimativa das alturas das árvores de *Pinus taeda* na parcela, a qual pode ser explicada pela dificuldade de penetração dos pulsos *LASER* no solo, já que a vegetação era relativamente densa e a floresta não era manejada. Com isso, o MDT gerado apresentou alguns erros (na ordem de 0,97 m)

comparado com os dados de estação total. Assim, com uma subestimativa na variável altura, todas as outras variáveis também foram subestimadas, mostrando que as médias para DAP e Volume são inferiores estatisticamente comparadas ao método adotado como paramétrico neste estudo e com o TLS.

Já para os dados TLS a filtragem é de suma importância para a eliminação de possíveis *outliers* presentes na nuvem de pontos. Um processo deficiente de filtragem, podem acarretar em erros na altura total assim como a dificuldade dos pulsos *LASER* recobrirem as regiões mais altas da árvore devido a densa copa e a galhos. Além disso, a filtragem também afeta na determinação do diâmetro e do volume das toras. Neste estudo, o processamento da nuvem de pontos TLS para a obtenção da altura total, diâmetro e volume, foram superiores e diferentes estatisticamente dos demais métodos, porém como neste estudo os valores paramétricos para comparação também foram estimados, não se tem a magnitude da precisão e dos erros das variáveis mensuradas. Porém, é interessante ressaltar que com o TLS é possível a extração de variáveis dendrométricas utilizando algoritmos (ex: ajuste da circunferência; modelagem tridimensional para o volume) de forma direta, diferentemente do ALS que são necessários modelos de regressão os quais já possuem um erro atrelado ao seu ajuste.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in *laser* scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. xxxvi – 8/w2. Freiburg, 2004.

BIENERT, A.; MAAS, H.G.; SCHELLER, S. Analysis of the information content of terrestrial laserscanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters. In: **Workshop on 3D Remote Sensing in Forest**, 14-15. Vienna, 2006.

BIENERT, A., et al. Tree detection and diameter estimations by analysis of Forest terrestrial lasescanner point clouds. **ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007**. Finland, 2007.

BROCH, S. C. **Aspectos teóricos e computacionais das estatísticas do teste de Dunnett Não – Central**. 2013. 241 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agrícola – Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, 2013.

BUCK, A. L. B. ; SILVA, M.N. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; MARTINS NETO, R. P. ; PESCK, V. A.. Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados laser terrestre. **Ambiência (Online)**, v. 8, p. 549-557, 2012.

BUCK, A. L. B. **Análise de métodos de filtragemem dados laser scanner terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus spp.*** 2012. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 2012b.

BUCK, A. L. B ; SILVA, M.N. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; MARTINS NETO, R. P. ; PESCK, V. A. . Mensuração de *Eucalyptus* spp. em uma parcela circular a partir de dados da varredura múltipla laser terrestre.. In: XI SenGeF, 2014, Curitiba. **Anais...**, p. 562-569, 2014a.

BUCK, A. L. B.; SILVA, M.N. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; MARTINS NETO, R. P. . Um algoritmo para filtragem do tronco em nuvem de pontos laser terrestre de árvores de *Pinus* spp.. **Boletim de Ciências Geodésicas (Online)**, v. 20, p. 806-829, 2014b.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCCHETTI, M. *LIDAR*: princípios e aplicações florestais. **Pesquisas Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n63, p. 231-244, 2010.

HEURICH, M.; THOMA, F. Estimation of Forestry stand parameters using *LASER* scanning data in temperature, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*). **Forestry**, Cary, v. 81, n. 5, p. 645 – 661, 2008.

LINGNAU, C. ; SILVA, M. N. ; SANTOS, D. S. ; MACHADO, A. ; LIMA, J. G. S. . Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. **Ambiência (UNICENTRO)**, v. 4, p. 85-96, 2008.

OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, L. M. T. ; FERREIRA, M. Z. ; OLIVEIRA, T.C.A. ; ACERBI JUNIOR,F.W. . Application of LIDAR to forest inventory for tree count in stands of Eucaliptus sp. **CERNE (UFLA)**, v. 18, p. 175/ 1-184, 2011.

OLIVEIRA, L. T de.; FERREIRA, M. Z.; CARVALHO, L. M. T de.; FERRAZ FILHO, A. C.; OLIVEIRA, T. C. A.;

SILVEIRA, E. M. O.; ACERBI JUNIOR, F. W. Determining timber volume of eucalyptus stands by airborne *LASER* scanning. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.**, Brasília , v. 49, n. 9, p. 692-700, set. 2014a.

OLIVEIRA, L. T de.; CARVALHO, L. M. T de.; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T. C. A.; BATISTA, V. T. F. P. Influência da idade na contagem de *Eucalyptus* sp. com dados *LIDAR*. **CERNE**, Lavras , v. 20, n. 4, p. 557-565, Dec. 2014b.

KIRÁLY, G; BROLLY, G.. Volume calculations of single trees based on terrestrial *laser* scanning. In: **SILVILASER**, 10º, 2010, Freiburg. **Proceedings...** Freiburg, 2010.

LIANG, X. *et al.* Plot-level trunk detection and reconstruction using one scan mode terrestrial *laser* scanning data. **2008 International workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications**, IEEE, China, Beijing, 30 June–2 Jul, 2008.

LINGNAU, C.; MACHADO, A.M.L.; BAVARESCO JUNIOR, A.; COLLA, F.L. Determinação de diâmetros a diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009.

LINGNAU, C. *et al.* Modelagem do fuste em povoamentos de *Pinus taeda* a partir da varredura *LASER* terrestre. In: Ix Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal, 2010, Curitiba. **Anais....** v. 1. p. 111-118, 2010.

LITKEY, P. et al. Single-scan TLS methods for Forest parameter retrieval. In: **Silvilaser 2008**, Edinburgh UK. p. 295 – 304, 2008.

MAAS, H.-G.; BIENERT, A., SCHELLER, S.; KEANE, E. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial *LASER* scanner data. **International Journal of remote sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579–1593, 2008.

MARTINS NETO, R. P. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; BUCK, A. L. B ; SILVA, M.N. ; PESCK, V. A. . Modelagem da seção transversal de *Pinus taeda* L. por meio da varredura *laser* terrestre. In: X SenGeF - X Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados à Engenharia Florestal, 2012, Curitiba.**Anais...**, p. 776-783, 2012.

MARTINS NETO, R. P.; BUCK, A. L. B.; SILVA, M. N.; LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; PESCK, V. A. Avaliação da varredura *LASER* terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n° 3, p. 420 – 433, jul – set, 2013a.

MARTINS NETO, R. P.; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; BUCK, A. L. B ; SILVA, M.N. ; PESCK, V. A. . Terrestrial laser scanning to obtain dendrometric variables in *Eucalyptus grandis* trees. In: Latin America Remote Sensing Week, 2013, Santiago. E-Book **LARS 2013**, 2013b

MARTINS NETO, R. P. ; CONTO, T. ; BUCK, A. L. B ; LINGNAU, C. ; PESCK, V. A. ; ZANON, M. L. B. . Proposta de um algoritmo para extração semiautomática do fuste em dados de varredura *LASER* terrestre e determinação do volume comercial. In: **Anais do 6º Simpósio LATINO-Americano sobre Manejo Florestal**, Santa Maria – RS, v. 6. p. 473-478, 2015.

MENGESHA, T.; HAWKINS, M.; NIEUWEMHUIS, M. Validation of terrestrial *LASER* scanning data using conventional forest inventory methods. **Eur J Forest Res**, 134:211–222, 2005.

NÆSSET, E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne *LASER* scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, p. 49– 56, 1997.

NÆSSET, E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning *LASER* using practical two – stage procedure and field data. **Remote Sensing Environ**, v. 80, p. 88– 99, 2002.

OLOFSSON, K.; HOLMGREN, J.; OLSSON, H. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. **Remote Sensing**, v. 6. p. 4323 - 4344, 2014.

PEINHOPF, C. **Determinação de variáveis dendrométricas de *Eucalyptus urograndis* com dados LIDAR aerotransportado.** 2012. 55p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Estadual do Centro – Oeste, Irati, 2012.

PEINHOPF, C.; FIGUEIREDO FILHO, A.; BERNARDI, D.; DOS SANTOS, J. R. Determinação da precisão de dados LiDAR analisados com *fusion* para medição de alturas em plantios florestais. In: XI SenGeF, 2014, Curitiba. **Anais....**, p. 307-312, 2014.

SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D. ; SANQUETTA, C. R. ; RODRIGUES, A. L. ; OLIVEIRA, K. A. . Ajuste de modelos hipsométricos para povoamento de *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don no Paraná. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, p. 70-77, 2014.

SILVA, C.A. ; KLAUBERG, C. ; HUDA, A. ; LIEBERMANN, R. ; CARVALHO, S. P. C. ; RODRIGUEZ, L.C.E. . Avaliação do uso da tecnologia *LiDAR* para predição da homogeneidade de um povoamento de *Eucalyptus* sp, baseado na extração de árvores individuais. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu, PR. *Anais...*, v. 1. p. 6089-6096, 2013.

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.

SILVA, M.N. ; BUCK, A. L. B ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; MARTINS NETO, R. P. ; PESCK, V. A. . *LASER Scanner Terrestre para medições florestais - Princípios e Aplicações*. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia (Online)**, v. 65, p. 1143-1152, 2013.

WEZYK, P., KOZIOL, K., GLISTA, M., PIERZCHALSKI, M., 2007. Terrestrial *LASER* scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests. **ISPRS Workshop on *LASER Scanning 2007* and *SilviLASER 2007***, Espoo, September 12-14, Finland, pp. 424- 442, 2007

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Varredura a *LASER* aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Forestalis (IPEF)**, v. 36, p. 295-306, 2008.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este estudo foi possível mostrar a aplicabilidade, a nível de parcela, no uso das tecnologias ALS e TLS na aquisição de dados para a determinação das variáveis dendrométricas.

Os objetivos propostos nos diferentes capítulos foram alcançados. No capítulo 2 o filtro *ATIN* foi o mais indicado para a classificação dos pontos na nuvem ALS comparando a sua precisão com dados de estação total. A identificação automática de árvores se mostrou satisfatória, com 60,38% das árvores detectadas na nuvem de pontos ALS e 96,23% na nuvem de pontos TLS comparando com a contagem visual das árvores em campo. O capítulo 4 mostrou a obtenção das variáveis dendrométricas altura total, DAP e volume total das árvores comparando os resultados obtidos em campo com o processamento das nuvens ALS e TLS, em que foi possível verificar diferenças estatísticas para altura entre os dados ALS (o qual subestimou esta variável) e os dados de campo; para o DAP e volume foi verificada diferença entre os dados TLS (o qual, superestimou estas variáveis) e os dados de campo.

Com isso, a hipótese afirmativa H0 que diz que não há diferenças estatísticas entre o inventário de campo e o processamento das nuvens ALS e TLS é rejeitada, aceitando a hipótese alternativa em que há diferenças estatísticas como explanado acima e nos resultados do Capítulo 4.

Algumas questões devem ser levadas em consideração na coleta de dados como, por exemplo, o tipo de informação que se deseja extrair da floresta.

Florestas com alta densidade de árvores e com diferentes estratos podem dificultar a penetração de pulsos ALS no solo, dificultando a extração de modelos digitais e estimativa de variáveis dendrométricas ou morfométricas que necessitem destes modelos. A ausência de desbastes, poda, excesso de sub-bosque também dificultam a obtenção de informações com o TLS, já que os dados obtidos serão referentes a outras estruturas

e não ao tronco propriamente dito. Ambas as situações foram vistas neste estudo, em que a densidade da floresta impediu um MDT mais preciso com relação ao parâmetro obtido com a estação total e a falta de manejo da floresta impediu a detecção de algumas árvores que se encontravam suprimidas e/ou oclusas.

A coleta de dados deve ser cuidadosamente planejada, com um conhecimento prévio do equipamento que será utilizado no levantamento. Dias sem vento são aconselháveis já que a presença do vento move o tronco da árvore ocasionando o deslocamento deste eixo, o que resulta em uma nuvem de pontos deslocada, ou chamados fantasmas nas nuvens, já que a mesma parte é representada em diferentes posições. Apesar da demarcação e numeração das árvores ter facilitado na sua identificação, ela foi demorada já que neste estudo não foi realizada a varredura colorida, a qual facilitaria o processo e não onera tanto o tempo de coleta de dados.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram o quanto promissoras são as tecnologias ALS e TLS para a mensuração e o inventário florestal, devendo seu potencial ser explorado para dinâmicas e estudos de crescimento e produção, inclusive em florestas nativas e conservação dos recursos naturais.

Mais pesquisas devem ser desenvolvidas para a detecção de copas na nuvem ALS, com o auxílio não somente da contagem visual em campo, como também de ortoimagens bem como a reconstituição das partes mais altas do tronco na nuvem TLS devido a copa.

Outra medida importante é a derrubada das árvores para viabilizar a validação das alturas e dos volumes das árvores encontradas com o LIDAR e com o inventário.

Como estudos futuros, realizar a integração de dados ALS e TLS entre si e com outros sensores para ampliar a gama de informações obtidas e sanar as deficiências de cada uma das tecnologias, bem como estudos econômicos avaliando os custos entre a utilização das tecnologias *LIDAR* e os métodos convencionais de inventário.