

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ LEONARDO BORTOLOTTO BUCK

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE FILTRAGEM EM DADOS *LASER SCANNER* TERRESTRE
APLICADOS À MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO TRONCO DE *Pinus* spp.**

CURITIBA

2011

ANDRÉ LEONARDO BORTOLOTTO BUCK

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE FILTRAGEM EM DADOS *LASER SCANNER* TERRESTRE
APLICADOS À MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO TRONCO DE *Pinus spp.***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Christel Lingnau.
Co-orientador: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima.
Machado

CURITIBA

2011

Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR

Buck, André Leonardo Bortolotto

Análise de métodos de filtragem em dados *laser scanner* terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus spp.* / André Leonardo Bortolotto
Buck. – 2011.

126 f. : il.

Orientador: Prof. Dra. Christel Lingnau

Coorientador: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 14/02/2012.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Troncos. 2. Modelagem de dados. 3. Pinus. 4. Teses. I. Lingnau, Christel. II. Machado, Álvaro Muriel Lima. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.92

CDU – 634.0.52

*Dedico este trabalho aos meus
pais: Adriane e Ailton Buck.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, não se pode chegar a lugar algum sem sua presença! Tudo se tornou muito mais agradável e descomplicado quando "conversei" com ele.

A minha família, pessoas que nunca poderei expressar minha gratidão pelo que fizeram e ainda fazem por mim: as oportunidades, os ensinamentos e a força que deram me incentivando à continuar em frente e concluir mais uma etapa de aprendizado.

Em especial, ao meu pai e minha mãe, acredito que já sabem o quanto amo fazer parte da vida deles e que se eu tivesse a oportunidade de escolher não poderia ter encontrado melhores pais do que eles.

Aos funcionários, professores, e amigos que fiz na Universidade Federal do Paraná - UFPR, que tão bem me acolheu e me proporcionou o aprendizado durante o mestrado, revelando um mundo que até então encontrava-se limitado para mim.

A meus orientadores de mestrado, professora Dra. Christel Lingnau pela orientação deste trabalho e ao professor Dr. Álvaro Muriel Lima Machado pela co-orientação e por me apresentar com paciência um pedaço do "temido" mundo da programação computacional.

Aos colegas e amigos que fiz no laboratório de Geoprocessamento, Matheus Nunes Silva pelas dicas, discussões sobre o assunto e no desenvolvimento da programação computacional; Rorai Pereira Martins Neto e Vagner Alex Pesck pelas horas dedicadas a coleta e processamentos de dados.

Ao programa de Reestruturação das Universidades Federais - REUNI por ter concedido uma bolsa de pesquisa para realização deste estudo no programa de pós-graduação em Engenharia Florestal - UFPR.

A Priscila de Medeiros Gomes, uma pessoa especial que durante esses dois anos separados pela distância sofreu "junto" comigo, por todo apoio, carinho, amor e compreensão.

As pessoas que acreditaram nessa pesquisa e que certamente vão continuar contribuindo e incentivando pesquisadores para realização de projetos envolvendo novas tecnologias para o manejo de florestas.

RESUMO

O emprego do equipamento *laser scanner* terrestre em aplicações florestais, apresenta-se na vanguarda de pesquisas envolvendo tecnologia para reconstrução do ambiente florestal. O modelo do tronco pode ser alcançado utilizando técnicas de modelagem tridimensional, desde que realizado o tratamento prévio da nuvem de pontos para eliminar galhos, folhas e outros objetos que se encontravam no campo de visada do equipamento e que não representem a superfície à ser modelada. Este trabalho teve como objetivo realizar a filtragem na nuvem de pontos *laser scanner* terrestre para prover dados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus* spp. Para o estudo foram coletados dados, por meio da varredura múltipla *laser* e da mensuração florestal, em 12 árvores das espécies de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* de um povoamento originado de dispersão natural e com ausência de tratamentos silviculturais. Inicialmente o processamento de dados *laser* foi feito de modo semi-automático, o qual recebeu o nome de Filtro Manual (FMa). Posteriormente, foram desenvolvidos e implementados, via programação computacional, quatro métodos automáticos para o isolamento do tronco: Filtro Seções Transversais (FSt), Filtro Seções Transversais Modificado (FMo), Filtro Distância Máxima (FDm) e Filtro Pontos Indexados (FPi). As nuvens de pontos produzidas pelos diferentes métodos de filtragem propostos foram submetidas à modelagem tridimensional e extraído, para cada árvore, o volume de toras em seções de um metro de comprimento. Os volumes obtidos foram confrontados com dados de cubagem rigorosa pelo método de *Huber*, e a validação dos métodos de filtragem foi realizada utilizando como parâmetro o volume verdadeiro (xilômetro). Os resultados foram analisados por meio de uma abordagem quali-quantitativa e inferência estatística. Problemas na filtragem podem ser apontados devido a presença de árvores adjacentes e a ação do vento. A média percentual de pontos selecionados na varredura múltipla é cerca de 30% para o método semi-automático e menos de 10% para os métodos automáticos. O isolamento do tronco foi eficiente até aproximadamente 60% da altura total das árvores. Os volumes obtidos na modelagem tridimensional não apresentaram diferença estatística significativa quando comparados ao valor paramétrico (teste de Tukey $\alpha = 0,05$) indicando que não existem diferenças estatísticas entre os métodos de filtragem testados. Os filtros desenvolvidos neste trabalho podem ser aplicados com êxito em dados *laser* terrestre de varredura múltipla para o gênero *Pinus* spp, sendo o Filtro Distância Máxima o mais indicado para realizar a filtragem do tronco.

Palavras chave: *laser scanner* terrestre, varredura múltipla, métodos de filtragem, modelagem do tronco, *Pinus* spp.

ABSTRACT

The use of terrestrial *laser scanner* equipment in forestry applications, presents itself at the forefront of research involving technology for reconstruction of the forest environment. The model of the trunk can be achieved using three-dimensional modeling techniques, if performed prior treatment of the point cloud to remove branches, leaves and other objects that were in the field of view of the equipment and do not represent the surface to be modeled. This study aimed to perform the filtering in the cloud of points for terrestrial *laser scanner* data to provide three-dimensional modeling of the stem of *Pinus* spp. For the study, data were collected through the multiple *laser* scanning and forestry measurement in 12 species of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* a settlement originated from natural dispersal and lack of silvicultural treatments. Initially, the *laser* data processing was done in a semi-automatic, which was named Manual Filter (FMa). Were subsequently developed and implemented via computer program, four automated methods for the isolation of the trunk: Cross Section Filter (FSt), Modified Cross Section Filter (FMo), Maximum Distance Filter (FDm) and Indexed Points Filter (FPi). The point clouds produced by different filtering methods proposed were submitted to three-dimensional modeling and extracted for each tree, the volume of logs into sections of one meter in length. The volumes obtained were compared to data from the cubed method of Huber and validation of the filtering was performed using the volume parameter as true (xylometer). The results were analyzed using a qualitative-quantitative approach and statistical inference. Filtering problems can be highlighted due to the presence of nearby trees and the wind. The average percentage of selected points in the scan multiple is about 30% for semi-automated method and less than 10% for the automated methods. The isolation of the trunk was effective up to about 60% of the total height of the trees. The volumes obtained in the three-dimensional modeling showed no statistically significant difference when compared to the parametric value (Tukey $\alpha = 0.05$) indicating that there are no statistical differences between the filtering methods tested. The filters developed in this work can be applied successfully in terrestrial *laser* scanning data for multiple *Pinus* spp, being the Maximum Distance Filter the most suitable to perform the filtering of the trunk.

Key-words: terrestrial *laser scanner*, multiple scanning, filtering methods, trunk modeling, *Pinus* spp.

LISTAS ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - DADOS GERADOS PELA MEDIÇÃO <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE. (A) PRIMEIRA ESTAÇÃO <i>LASER</i> . (B) SEGUNDA ESTAÇÃO <i>LASER</i> . (A e B) - DADOS REFERENCIADOS UNIDOS EM UM MESMO SISTEMA DE COORDENADAS DÃO ORIGEM A VARREDURA MÚLTIPLA.....	19
FIGURA 2 - MODELAGEM DO TRONCO. a) NUVEM DE PONTOS ORIGINAL; b) SEQUÊNCIA DE CILINDROS AJUSTADOS; c) EIXO MÉDIO DE CILINDROS E MODELAGEM DO TRONCO	27
FIGURA 3 - MÉTODO <i>Free Form Polygon</i> (FFP)	29
FIGURA 4 - ÁREA DE ESTUDO	31
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA DE TRABALHO	33
FIGURA 6 - <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE <i>Cyrax HDS3000</i>	34
FIGURA 7 - CAMPO DE VISADA DO <i>LASER</i>	35
FIGURA 8 - COMPONENTES DO SISTEMA <i>LASER SCANNER</i> HDS 3000	36
FIGURA 9 - ALVOS UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO <i>LASER</i> - <i>Tilt & Turn target</i>	38
FIGURA 10 - HIPSÔMETRO VERTEX IV	40
FIGURA 11 - FUNCIONAMENTO DO XILÔMETRO.....	41
FIGURA 12 - VARREDURA MÚLTIPLA DE DADOS <i>LASER</i> PARA ÁRVORE INDIVIDUAL.....	48
FIGURA 13 - PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS UTILIZANDO DUAS ESTAÇÕES <i>LASER</i>	49
FIGURA 14 - OPERAÇÕES DE COLHEITA: (a) CORTE, (b) DESGALHAMENTO, (c) TRAÇAMENTO, (d) TRANSPORTE DE TORETES.....	51
FIGURA 15 - PONTO DE MEDIÇÃO (PM) DE DIÂMETROS E CIRCUNFERÊNCIAS - TORA 1	52
FIGURA 16 - IMERSÃO DA TORA NO XILÔMETRO E ESCALA GRADUADA (dm ³)	53
FIGURA 17 - ISOLAMENTO DA ÁRVORE NA NUVEM DE PONTOS.	56
FIGURA 18 - NUVEM DE PONTOS E DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS	57

FIGURA 19 - REGIÃO DE BUSCA DE PONTOS <i>LASER</i> DO TRONCO: (a) DEFINIÇÃO DOS LIMITES DA REGIÃO DE BUSCA, (b) APLICAÇÃO DA REGIÃO DE BUSCA AO LONGO DO TRONCO, (c) DETALHE DE UMA SEÇÃO UTILIZANDO A REGIÃO DE BUSCA.	61
FIGURA 20 - PROCEDIMENTO CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA (C.O)	63
FIGURA 21 - ALGORITMO DO PROCEDIMENTO CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA (C.O.)	64
FIGURA 22 - PROCEDIMENTO SELEÇÃO DE PONTOS (S.P.)	65
FIGURA 23 - ALGORITMO DO PROCEDIMENTO SELEÇÃO DE PONTOS (S.P.)..	66
FIGURA 24 - PROCEDIMENTO PADRÃO ($f_{atia}=0$): (a) PRIMEIRA APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA, (b) APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO SELEÇÃO DE PONTOS, (c) SEGUNDA APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA.....	68
FIGURA 25 - ROTINA DE FILTRAGEM 1 PARA $f=0$	69
FIGURA 26 - ROTINA FILTRO SEÇÕES TRANSVERSAIS (FSt)	71
FIGURA 27 - ROTINA FILTRO SEÇÕES TRANSVERSAIS MODIFICADO (FM ₀)...	73
FIGURA 28 - FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO <i>Mean shift</i>	74
FIGURA 29 - PROCEDIMENTO ESTABILIZA DESVIO PADRÃO.....	75
FIGURA 30 - ROTINA FILTRO DISTÂNCIA MÁXIMA (FD _m)	76
FIGURA 31 - ROTINA FILTRO PONTOS INDEXADOS (FP _i).....	77
FIGURA 32 - PROCEDIMENTO SEPARAÇÃO EM TORAS.....	78
FIGURA 33 - REDE TRIANGULAR IRREGULAR.....	79
FIGURA 34 - MEDIÇÃO <i>LASER</i> DA ÁRVORE 12	87
FIGURA 35 - NUVEM DE PONTOS: (a) ÁRVORE ORIGINAL, (b) PRODUTOS DA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FILTRAGEM DESENVOLVIDOS - 45º.....	88
FIGURA 36 - NUVEM DE PONTOS DA ÁRVORE E METODOLOGIAS DE FILTRAGEM APLICADAS.....	89
FIGURA 37 - ESCALA DE CORES PARA O SOMATÓRIO DE LINHAS E COLUNAS	90
FIGURA 38 - REGISTRO FOTOGRÁFICO REFERENTE A BASE DAS ÁRVORES UM E DOIS.....	92
FIGURA 39 - NUVEM DE PONTOS PRODUZIDA PELA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FILTRAGEM NA PORÇÃO 50% DA ALTURA TOTAL PARA ÁRVORE TRÊS.....	94

FIGURA 40 - NUVEM DE PONTOS ORIGINAL NA PORÇÃO 50% DA ALTURA TOTAL PARA ÁRVORE TRÊS	95
FIGURA 41 - NUVEM DE PONTOS E REGISTRO FOTOGRÁFICO DA COPA DA ÁRVORE DOIS	97
FIGURA 42 - PERCENTUAL MÉDIO DE PONTOS SELECIONADOS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE ROTINAS DE FILTRAGEM.....	101
FIGURA 43 - PERCENTUAL MÉDIO DE PONTOS REPETIDOS	102
FIGURA 44 - PERCENTUAL MÉDIO DE PONTOS DO TRONCO NÃO REPETIDOS EM RELAÇÃO AOS PONTOS DA NUVEM TOTAL DA ÁRVORE.....	103
FIGURA 45 - VALORES EXTRAÍDOS DA MEDIÇÃO <i>LASER</i>	104
FIGURA 46 - PERCENTUAL DE SUPERFÍCIE DO TRONCO FILTRADA	105
FIGURA 47 - PROCESSAMENTO DA NUVEM DE PONTOS: (a) NUVEM DE PONTOS ORIGINAL, (b) NUVEM FILTRADA, (c) DIVISÃO EM TORAS	106
FIGURA 48 - ÁRVORE 7 - PRIMEIRA TORA FILTRADA POR DIFERENTES MÉTODOS	107
FIGURA 49 - ÁRVORE 7 - PRIMEIRA TORA MODELADA A PARTIR DE DADOS DE DIFERENTES MÉTODOS DE FILTRAGEM	107
FIGURA 50 - PERCENTUAL DE TORAS MODELADAS EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE TORAS XILOMETRADAS	109
FIGURA 51 - PERFIL DA ÁRVORE REPRESENTADO PELOS MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO VOLUME (ÁRVORES 1 a 4).....	112
FIGURA 52 - PERFIL DA ÁRVORE REPRESENTADO PELOS MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO VOLUME (ÁRVORES 5 a 8).....	113
FIGURA 53 - PERFIL DA ÁRVORE REPRESENTADO PELOS MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO VOLUME (ÁRVORES 9 a 12).....	114
FIGURA 54 - TELA DE ENTRADA DO <i>SOFTWARE DENDROLASER</i>	118

LISTAS DE TABELAS

TABELA 1 - MENSURAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS PRÉ-CORTE..	47
TABELA 2 - NÚMERO DE PONTOS DA NUVEM ORIGINAL PARA O CONJUNTO DE ÁRVORES.....	100
TABELA 3 - NÚMERO DE TORAS MEDIDAS PELO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE ÁGUA (XILÔMETRO).....	108
TABELA 4 - VOLUME DE TORAS MODELADAS TRIDIMENSIONALMENTE.....	110
TABELA 5 - SOMATÓRIO DE VOLUME DAS TORAS PARA CADA ÁRVORE	115

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PRINCÍPIO TEMPO DE VÔO - PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS	16
QUADRO 2 - PRINCÍPIO MUDANÇA DE FASE - PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS..	16
QUADRO 3 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CYRAX HDS 3000.....	34
QUADRO 4 - REQUISITOS MÍNIMOS PARA O COMPUTADOR PORTÁTIL.....	38
QUADRO 5 - PARÂMETROS DE VARREDURA <i>LASER SCANNER</i> UTILIZADOS.	50
QUADRO 6- PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O PROCESSAMENTO DE DADOS.	60
QUADRO 7 - DIVISÃO DOS GRUPOS DE ACORDO COM A CLASSE DIAMÉTRICA.....	85
QUADRO 8 - PROBLEMAS DA FILTRAGEM NA PORÇÃO CORRESPONDENTE A BASE DA ÁRVORE.....	91
QUADRO 9 - PROBLEMAS DA FILTRAGEM PARA A PORÇÃO CORRESPONDENTE A 50% DA ALTURA TOTAL DA ÁRVORE	93
QUADRO 10 - PROBLEMAS DA FILTRAGEM PARA A PORÇÃO CORRESPONDENTE A 75% DA ALTURA TOTAL DA ÁRVORE	96
QUADRO 11 - PROBLEMAS DA FILTRAGEM PARA A PORÇÃO CORRESPONDENTE A 75% DA ALTURA TOTAL DA ÁRVORE	98
QUADRO 12 - <i>RANKING</i> DE DESEMPENHO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE FILTRAGEM SUBMETIDOS À ANÁLISE VISUAL	99
QUADRO 13 - RESULTADO DA APLICAÇÃO DO TESTE F NA ANÁLISE DE VARIÂNCIA. NS - NÃO SIGNIFICATIVO; * SIGNIFICATIVO A 95%.....	116

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2 HIPÓTESES	14
1.3 OBJETIVO GERAL	14
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 <i>LASER SCANNER</i> - CONCEITOS E DEFINIÇÕES	15
2.2 <i>Laser scanner</i> terrestre e a mensuração florestal.....	17
2.3 Levantamento <i>laser</i> em árvores.....	19
2.4 O processamento da nuvem de pontos	20
2.4.1 Identificação de árvores.....	22
2.4.2 Separação entre a superfície do terreno e a base da árvore.....	22
2.4.3 Obtenção de variáveis dendrométricas	23
2.4.4 Diâmetro	24
2.4.5 Filtragem e modelagem de dados <i>laser scanner</i>	26
3 MATERIAL E METODOLOGIA	31
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
3.2 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DO PROJETO	32
3.3 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO <i>LASER</i>	33
3.3.1 <i>Laser scanner</i> Terrestre.....	33
3.3.2 Alvos	37
3.3.3 Computador portátil	38
3.4 INSTRUMENTOS PARA MENSURAÇÃO FLORESTAL	39
3.4.1 Suta e fita métrica.....	39
3.4.2 Hipsômetro Vertex	40

3.4.3	Xilômetro.....	41
3.5	SOFTWARES	42
3.5.1	<i>Software</i> "Cyclone 5.1"	42
3.5.2	<i>Softwares</i> "Microsoft Office Excel" e "Visual Basic for Applications"	43
3.5.3	<i>Software</i> "3DReshaper Application".....	44
3.5.4	<i>Softwares</i> estatísticos.....	45
3.6	COLETA DE DADOS	46
3.6.1	Varredura <i>laser</i>	48
3.6.2	Mensuração Florestal	51
3.7	PROCESSAMENTO	54
3.7.1	Nuvem de pontos.....	54
3.7.2	Cubagem Rigorosa.....	80
3.8	ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE DADOS	81
3.8.1	Análise qualitativa.....	82
3.8.2	Análise quantitativa.....	83
3.8.3	Inferência estatística.....	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.1	Análise qualitativa	87
4.2	Análise quantitativa.....	100
4.2.1	A nuvem de pontos do tronco	100
4.2.2	A modelagem do tronco.....	105
4.2.3	Inferência estatística.....	116
4.3	<i>Software Dendrolaser v2.0</i>	117
5	CONCLUSÕES	119
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
	REFERÊNCIAS	122

1 INTRODUÇÃO

A importância da madeira para o homem, como produto direto e de outros bens indiretos, acentua a necessidade de procedimentos eficientes para quantificar e avaliar os povoamentos florestais (SOARES *et al.*, 2006).

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

Atualmente, equipamentos que utilizam a energia *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) para obter dados tridimensionais acerca dos objetos, tem apresentado grande potencial de aplicação no levantamento florestal (LINGNAU *et al.* 2007).

Dentre os benefícios de se empregar o equipamento *laser scanner* terrestre para mensuração de árvores, destaca-se a confiabilidade posicional dos dados presentes na nuvem de pontos e a exclusão de erros advindos do operador do instrumento ou até mesmo de dispositivos e métodos diferentes utilizados na medição (SIMONSE *et al.* 2003).

O processamento de dados *laser* 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 e estudos de volumetria sem empregar métodos destrutivos.

No entanto, a nuvem de pontos de coordenadas (X,Y,Z) gerada na medição *laser*, apresenta dados referentes ao tronco, galhos, folhas e outros objetos que se encontravam no campo de visada do equipamento, dados que devem ser eliminados para geração do modelo tridimensional do tronco da árvore (LITKEY *et al.*, 2008; LIANG *et al.*, 2008).

Desta forma, o isolamento da superfície do tronco é etapa indispensável à construção de um modelo tridimensional acurado, tornando o desenvolvimento de métodos de filtragem automáticos parte fundamental no processamento de dados.

O presente estudo contempla o desenvolvimento e implementação da filtragem para isolar o tronco e subsidiar a modelagem tridimensional do volume de árvores do gênero *Pinus* spp., apresentando procedimentos e rotinas de processamento de dados *laser scanner* terrestre destinados a mensuração florestal.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de pesquisa consiste na filtragem de pontos *laser scanner* terrestre que representem a superfície do tronco da árvore para aplicação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus spp.*

1.2 HIPÓTESES

As hipóteses levantadas para responder o problema de pesquisa são:

- I. A aplicação da filtragem na nuvem de pontos *laser* de uma árvore resulta em dados apropriados à modelagem tridimensional do tronco.
- II. Os dados disponibilizados pela aplicação de diferentes métodos de filtragem não diferem significativamente quando submetidos à modelagem tridimensional para obtenção do volume do tronco.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e analisar métodos de filtragem da nuvem de pontos *laser scanner* terrestre visando à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus spp.*

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver métodos de filtragem para o isolamento do tronco e implementá-los via programação em forma de rotinas computacionais;
- Submeter os dados filtrados à modelagem tridimensional para obtenção da variável volume;
- Validar os métodos de filtragem utilizando como parâmetro o volume verdadeiro (Xilômetro) e confrontar os resultados com a cubagem rigorosa de árvores.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LASER SCANNER - CONCEITOS E DEFINIÇÕES

O *Laser - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, inventado em 1960 por Theodore H. Maiman, teve como precedentes de sua pesquisa dois importantes acontecimentos do meio científico: a publicação, em 1917, de um artigo em que Albert Einstein sugeriu a emissão estimulada de radiação luminosa e que incentivou o desenvolvimento dos amplificadores e osciladores; e a invenção, em 1954, do MASER - *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, seguindo os passos das pesquisas realizadas durante a Segunda Guerra Mundial com o RADAR - *Radio Detection and Ranging*. (BRANDALIZE & PHILIPS, 2002).

A luz *laser* possui características únicas: monocromaticidade, alta intensidade, direção e coerência, que o tornam um excelente instrumento de uso científico e tecnológico (BAGNATO, 2001).

Pode-se dizer que a propriedade mais importante da luz emitida por um *laser* é a sua coerência. O que significa dizer que todos raios de luz individuais possuem mesmo comprimento de onda e estão todos em fase (alinhados). Isto se deve ao fato de que a energia emitida não se dissipa a medida que estes raios se propagam, o que permite concentrá-la em um ponto finamente definido e aumentar significativamente o seu alcance (CARROLL, 1978; BRANDALIZE & PHILIPS, 2002).

Para Dalmolim e Santos (2004), a nomenclatura para o sistema *laser* é apontada por autores que defendem a idéia 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*".

Nos equipamentos *laser* destinados aos levantamentos terrestres e aéreos tal tecnologia é utilizada na determinação de distâncias (entre o dispositivo *laser* e um alvo) por meio de duas técnicas distintas (*Time of Flight* e *Phase-shift*), dependendo do modo de operação do *laser* (pulsado ou contínuo) (BRANDALIZE & PHILIPS, 2002).

O diferencial de utilização desses princípios nos equipamentos *laser scanner* terrestre reside na velocidade de coleta de dados e na distância fixada para determinada precisão. A velocidade de amostragem da tecnologia que utiliza o princípio tempo de vôo é menor do que a tecnologia que utiliza o princípio da diferença de fase, contudo, a precisão para longas distâncias é maior.

Nos quadros a seguir podem ser verificados os principais equipamentos e fabricantes disponíveis no mercado que utilizam os princípios de *scanners* por tempo de vôo (QUADRO 1) e *scanners* por diferença de fase (QUADRO 2).

Fabricante	Modelo	Alcance (m)	Velocidade (Max) (Pontos/sec)	Fonte
Optech	ILRIS-3D	1200	3.500	www.optech.ca
	ILRIS-3D-ER	1700	3.500	
	ILRIS-HD	1250	10.000	
	ILRIS-HD-ER	1800	10.000	
	ILRIS-LR	3000	10.000	
Leica-Geosystems /	HDS-8800	2000	8.800	www.leica-geosystems.com
	C-10	300	50.000	
Cyra Technologies	HDS-3000	100	1.800	
	ScanStation2	300	50.000	
Riegl	LMS-Z390i	400	11.000	www.riegl.com
	LMS-Z420i	1000	11.000	
	LMS-Z620	2000	11.000	
	Riegl VZ-1000	1400	122.000	
	Riegl VZ-400	600	122.000	
	LPM-321	6000	1.000	

QUADRO 1 - PRINCÍPIO TEMPO DE VÔO - PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS
 FONTE: SILVA (2011).

Fabricante	Modelo	Intervalo de Ambiguidade (m)	Velocidade (Pontos/seg)	Fonte
Leica-Geosystems/	HDS-6100	79	508.000	www.leica-geosystems.com
	HDS-6200	79	1.016.727	
Cyra technologies	HDS-4500	25	500.000	
	HDS-4500	53	500.000	
FARO	Photon 120/20	120	976.000	www.faro.com
Zoller + Fröhlich	IMAGER 5003	79	1.016.727	www.zf-laser.com
	IMAGER 5006EX	79	508.000	
	IMAGER 5006H	79	1.016.727	
	IMAGER 5010	187,3	1.016.000	

QUADRO 2 - PRINCÍPIO MUDANÇA DE FASE - PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS
 FONTE: SILVA (2011).

Desta forma, para levantamentos a curtas distâncias que necessitem de uma alta densidade de pontos coletados, seria ideal um equipamento com tecnologia de mudança de fase. Já no caso de levantamento de objetos que estão a grandes distâncias, um equipamento com sistema de tempo de voo tem as características mais indicadas para estas aplicações (MÁRQUEZ, 2010).

O *laser scanner* terrestre é normalmente montado sobre um tripé ou plataforma estável, que explora, por meio do *laser*, os elementos do espaço circundante. Em geral, o equipamento se move horizontalmente no sentido horário deslocando-se em pequenos intervalos angulares. A cada intervalo angular (horizontal) o equipamento permanece estático, e por meio de um telescópio ou espelho giratório dispara o *laser* verticalmente em intervalos angulares determinados, calculando as coordenadas dos pontos que refletem o sinal (MARQUEZ, 2010).

Os dados disponibilizados pela varredura *laser* podem ser processados para modelar diferentes superfícies. Estudos estão sendo realizados em diversas áreas de aplicação, tais como: mapeamento topográfico, planejamento e desenvolvimento urbano, aplicações médicas, monitoramento e gerenciamento de obras e projetos de engenharia, setor florestal.

As técnicas empregadas no processamento bem como o desenvolvimento de algoritmos para tratamento dos dados são o grande desafio dos pesquisadores que direcionam seus trabalhos na utilização do *laser scanner* para geração de modelos coerentes das superfícies medidas.

2.2 *Laser scanner* terrestre e a mensuração florestal

A medição e a quantificação de recursos florestais foram necessárias mediante a um cenário de elevação do valor da madeira e de seus produtos, vinculado a considerável redução dos maciços florestais na Europa, berço da dendrometria (MACHADO E FIGUEIREDO FILHO, 2006).

Segundo Prodan *et al.*, (1997), os princípios da mensuração florestal surgiram no final do século XVIII. Desde então, se desenvolveu o campo da

mensuração florestal, com objetivo de fornecer informações sobre uma floresta por meio de medidas ou métodos estimativos.

Em campo, instrumentos graduados tais como: fita métrica, suta e hipsômetro são utilizados tradicionalmente para medir duas variáveis importantes em trabalhos de inventário florestal, o diâmetro a altura do peito e a altura total da árvore.

Requerido o levantamento de variáveis de difícil medição, como diâmetros ao longo do tronco, utilizados para ajuste de equações de volume e funções de forma, a atividade torna-se inviável sem a derrubada da árvore, caracterizando um processo destrutivo e moroso (BIENERT *et al.* 2006a).

Avanços tecnológicos tem proporcionado a introdução de diferentes equipamentos para se obter diâmetros, alturas e até mesmo volume de árvores em pé, dentre estes, cabe destaque ao sistema *laser scanner* terrestre, o qual tem apresentado resultados promissores à mensuração de árvores (LICHTI *et al.*, 2000, 2002).

A precisão dos dados da medição *laser* e o número de variáveis dendrométricas que podem ser obtidas de forma automatizada caracterizam o diferencial desta tecnologia. A nuvem de pontos, também pode ser trabalhada para o acompanhamento de tratos silviculturais como, por exemplo, em simulações de podas e desbastes. (LINGNAU, *et al.*, 2009).

Não obstante, o equipamento pode ser empregado para o levantamento de informações qualitativas de difícil mensuração: geometria ao longo do tronco da árvore, tortuosidade, inserção de galhos e danos presentes no tronco. Todas essas características podem ser exploradas no processamento da medição *laser* (MAAS *et al.*, 2008).

Neste contexto, pesquisadores estão direcionando esforços para a aplicação do *laser scanner* terrestre no levantamento florestal. O processamento de dados para obtenção de variáveis dendrométricas de forma automatizada é o grande desafio a ser superado para viabilização desta tecnologia como ferramenta aos profissionais de engenharia.

2.3 Levantamento *laser* em árvores

O levantamento de dados utilizando *laser scanner* terrestre pode ser realizado por meio de uma ou de múltiplas estações. Quando a medição é realizada utilizando apenas uma estação *laser*, a nuvem de pontos gerada pode ser qualificada como dados de varredura simples (FIGURA 1 - AB).

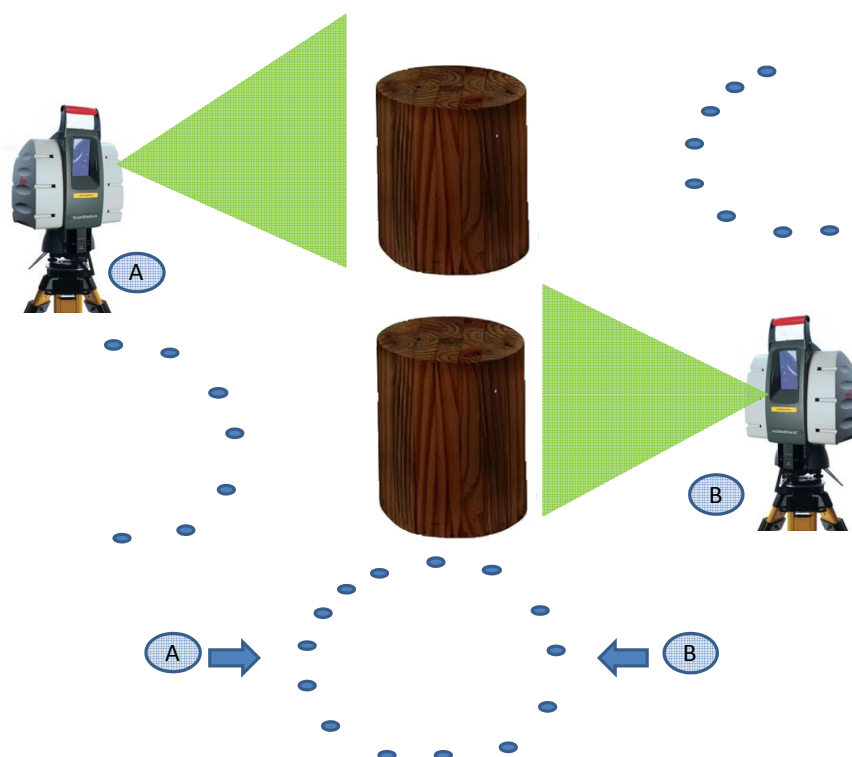


FIGURA 1 - DADOS GERADOS PELA MEDIÇÃO *LASER SCANNER* TERRESTRE. (A) PRIMEIRA ESTAÇÃO *LASER*. (B) SEGUNDA ESTAÇÃO *LASER*. (A e B) - DADOS REFERENCIADOS UNIDOS EM UM MESMO SISTEMA DE COORDENADAS DÃO ORIGEM A VARREDURA MÚLTIPLA.
FONTE: Adaptado de SILVA (2011)

Já o recobrimento total da árvore pode ser alcançado utilizando duas ou mais estações *laser*. A união das nuvens de pontos de varreduras simples, tomadas em diferentes posições em relação ao objeto de interesse, caracteriza um conjunto de dados de varredura múltipla (FIGURA 1 - A e B).

Portanto, na medição de árvores, os dados de varredura simples irão representar 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 à velocidade de coleta de dados em campo e a 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 diâmetros, 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.

Dados coletados para geração da nuvem de pontos de varredura múltipla irão representar o objeto de interesse com nível de detalhamento superior, no entanto, o tempo requerido para a medição será maior. A necessidade de distribuição de alvos para o registro das coordenadas, o trabalho de transportar, reinstalar e religar o equipamento em diferentes locais podem onerar a realização do levantamento (BIENERT *et al.*, 2006a).

2.4 O processamento da nuvem de pontos

Os dados *laser* podem ser definidos como representações pontuais de objetos encontrados no campo de visada da estação *laser scanner* terrestre no momento da varredura.

A aplicação do equipamento *laser scanner* no levantamento de árvores tem como produto inicial uma nuvem de pontos de coordenadas tridimensionais, dados brutos, que precisam ser processados para alcançar a informação desejada sobre a árvore ou parte dela.

O processamento da nuvem de pontos de um levantamento florestal remete a obtenção de variáveis dendrométricas e informações relevantes à forma da árvore, procedimentos que só podem ser realizados em ambiente computacional.

Existem basicamente duas formas para o processamento da nuvem de pontos: processamento semi-automático, em que ocorre a interação do usuário com

ferramentas de seleção de pontos já desenvolvidas e implementadas via *software*; e o processamento automático, representado pela implementação computacional de algoritmos para o processamento dos dados *laser*.

A combinação entre as duas formas de processamento é o que tem sido observado em muitos trabalhos, no entanto, estudos estão sendo realizados para que seja possível realizar o processamento da nuvem de pontos de forma automática.

Trabalhos que dizem respeito às diferentes etapas do processamento de dados *laser* obtidos em ambiente florestal, seja para extração de informações de árvores individualizadas ou de um conjunto na floresta, podem ser encontrados na literatura.

As referências teóricas dizem respeito à identificação de árvores na nuvem de pontos (SIMONSE *et al.*, 2003; ASCHOFF *et al.*, 2004; BIENERT *et al.*, 2007), ao posicionamento do equipamento para coleta de dados (LIANG *et al.*, 2008; LITKEY *et al.*, 2008), a obtenção de variáveis dendrométricas (ASCHOFF *et al.*, 2004; BIERNET *et al.*, 2006b; BIERNET *et al.*, 2007; LIANG *et al.*, 2008; LITKEY *et al.*, 2008), a filtragem e modelagem de pontos *laser* (SIMONSE *et al.*, 2003; PFEIFER *et al.*, 2004; BROLLY E KIRÁLY, 2009; LITKEY *et al.*, 2008; KILARY E BROLLY., 2010) e a informações sobre as dificuldades superadas e desafios no emprego desta tecnologia em ambiente florestal (MAAS *et al.*, 2008; LINGNAU, *et al.*, 2009).

Ao se trabalhar com o processamento da nuvem de pontos 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.

A etapa de filtragem dos dados, escopo deste trabalho, é referenciada por autores como uma consequência da etapa de obtenção de variáveis dendrométricas e, muitas vezes, é suprimida do processamento de dados.

Os algoritmos desenvolvidos para determinação de diâmetros e áreas transversais, em sua essência, apresentam boas soluções, porém os resultados não são consistentes quando se toma valores em porções próximas ao ápice da árvore. No decorrer deste trabalho será feita referência aos procedimentos de obtenção de diâmetros e área transversais que podem contribuir com o desenvolvimento da filtragem de dados *laser* terrestre.

2.4.1 Identificação de árvores

No que se refere à identificação de árvores na varredura *laser*, Simonse *et al.*, (2003), Aschoff *et al.*, (2004), Bienert *et al.*, (2007), desenvolveram estudos baseados em um diâmetro pré-estabelecido e análise de tendência de pontos em formar circunferências.

Os resultados encontrados apresentaram valores elevados para identificação das árvores, Simonse *et al.* (2003) encontraram correspondência de cerca de 90% dos indivíduos identificados e Bienert *et al.*, (2007) identificaram cerca de 97% de árvores automaticamente no processamento da nuvem de pontos.

Sabe-se que a alocação do equipamento em campo afeta diretamente a identificação das árvores no levantamento de dados em campo. A sobreposição de árvores é apontada como sendo o principal problema na identificação dos indivíduos. Desta forma, é recomendado que se utilize um maior número de estações *laser* para evitar a sobreposição de árvores na varredura (LIANG *et al.*, 2008; LITKEY *et al.*, 2008).

No laboratório de geoprocessamento do Departamento de Ciências Florestais - UFPR, estudos estão sendo realizados utilizando a identificação visual de árvores na varredura *laser*, onde cada indivíduo identificado é selecionado e isolado da nuvem de pontos original para um novo arquivo de dados que irá conter pontos de apenas uma árvore.

Identificadas as árvores, de forma semi-automática ou automática, passa a existir o problema de separação entre pontos do terreno e dados da superfície do início do tronco da árvore.

2.4.2 Separação entre a superfície do terreno e a base da árvore

Visualmente pode ser encontrado o limite que marca o início do tronco da árvore em relação à superfície do terreno. Utilizando ferramentas de edição, método semi-automático, é alcançada a separação superfície do terreno e base da árvore.

A automatização desta etapa foi alcançada por meio da geração de um modelo digital do terreno (MDT), que permitiu encontrar o ponto de menor cota de cada árvore, a partir do qual são recalculados os demais pontos, obtendo a altura total e parcial ao longo do fuste (SIMONSE *et al.* 2003; BIENERT *et al.*, 2006b).

Litkey *et al.*, (2008) propôs a utilização de um raio de um metro da árvore para encontrar pontos com os menores valores de cota em relação ao eixo Z, sendo que os pontos selecionados representariam a superfície do terreno na área pré-estabelecida.

A separação entre o terreno e o início do tronco é um procedimento indispensável para a obtenção de variáveis dendrométricas, visto que todos os valores relacionados a altura da árvore estão atrelados a base do tronco. Desta forma, a separação deve ser feita com cautela.

Realizada a identificação e a separação da árvore do terreno é possível processar os dados para obtenção da variável dendrométrica: altura total da árvore, de forma automatizada.

2.4.3 Obtenção de variáveis dendrométricas

A obtenção de variáveis dendrométricas foi subdividida, para melhor compreensão, em altura total e diâmetros. Nos itens a seguir poderão ser encontrados conceitos, métodos e os principais resultados encontrados na literatura em estudos sobre essa temática.

2.4.3.1 Altura total

No processamento de dados *laser* a altura da árvore pode ser definida como a distância entre o ponto mais baixo do fuste e a ponta da copa (ASCHOFF *et al.*, 2004; HOPKINSON *et al.*, 2004; BIENERT *et al.*, 2006b, SILVA *et al.*, 2011).

Estudos apontam que a variável altura, obtida por métodos tradicionais de mensuração ou com a árvore derrubada (valor paramétrico), apresenta valores

compatíveis com os resultados encontrados no processamento de dados *laser scanner* terrestre.

Hopkinson *et al.* (2004) comparou a altura total obtida no processamento *laser* utilizando como referência a altura medida com o hipsômetro. Os resultados obtidos no processamento de dados subestimaram a altura da árvore em 1,5 metros para árvores de *Pinus resinosa* e *Accer saccharum*. A medição da altura total de duas árvores, também medidas com o hipsômetro, apresentou diferenças de 0,22 e 1,47 metros comparadas ao *laser* (BIENERT *et al.*, 2006a). Confrontando dados *laser* e informações de inventário florestal foi apontado erro médio de 0,79 metros para a altura total de coníferas da espécie *Pinus sylvestris* (Wezyk *et al.* (2007).

Com o objetivo de avaliar a altura de árvores, utilizando o equipamento *laser scanner* terrestre, autores (LINGNAU *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2011; MARTINS NETO *et al.*, 2011) realizaram estudos dispensando a utilização do MDT. A separação árvore / terreno foi realizada de forma semi-automatizada. Os resultados encontrados são semelhantes aos apresentados quando se utiliza o MDT.

Martins Neto *et al.*, (2011), realizaram a comparação entre dados *laser* e valores de altura medidos com a trena para duas árvores de *Pinus* sp. derrubadas (valor paramétrico), obtendo como resultado erro inferior a 3,67% para as duas árvores medidas.

Problemas com subestimação de altura foram relatados por Hopkinson *et al.*, (2004), Wezyk *et al.*, (2007), Silva *et al.*, (2011), os quais verificaram que o erro poderia estar atribuído à densidade de folhas na copa, galhos, mau posicionamento do equipamento, e baixa quantidade de pontos na varredura.

Diante do exposto é perceptível que a implementação de algoritmos para a obtenção da altura da árvore não é uma tarefa complicada desde que se tenha o ponto de referência da base do tronco. A informação referente à altura total da árvore torna viável a obtenção da variável diâmetro em diferentes alturas da árvore.

2.4.4 Diâmetro

O tratamento da nuvem de pontos *laser* para obtenção de diâmetros em diferentes alturas do tronco da árvore de forma automatizada remete a utilização de

algoritmos mais complexos, envolvendo conceitos de álgebra, trigonometria estatística e análise de regressão.

O ajuste da nuvem de pontos para obtenção da variável diâmetro foi realizado por autores que utilizaram diferentes metodologias: mínimos quadrados (ASCHOFF *et al.*, 2004; , BIERNET *et al.*, 2006a; BIERNET *et al.*, 2007, LIANG *et al.*, 2008; LITKEY *et al.*, 2008), funções Spline (PFEIFER e WINTERHALDER, 2004), e análise multivariada combinada à mínimos quadrados (LALONDE *et al.*, 2006).

Resultados apresentados para obtenção da variável diâmetro pelo processamento da nuvem de pontos *laser* tem apresentado alta correlação com dados tradicionais de campo. Hopkinson *et al.* (2004) chegaram a um coeficiente de determinação (R^2) de 0,85 e Wezyk *et al.* (2007) alcançaram o valor de $R^2 = 0,94$ quando comparados com resultados tradicionais.

Em termos absolutos Bienert, Maas e Scheller (2006) obtiveram em média desvio de 1,5 cm em relação às medições de diâmetros tradicionais. Em termos relativos Thies e Spiecker (2004) relatam medidas do DAP com desvio padrão de 1,3% em relação aos dados tradicionais.

Silva (2011) propôs a utilização dos mínimos quadrados para uma função que busca ajustar uma circunferência para nuvem de pontos de uma fatia do tronco da árvore por meio da minimização da variância ou do desvio padrão das distâncias euclidianas em relação ao centro da fatia. Como resultado a média das distâncias euclidianas correspondem ao raio da circunferência ajustada, e por conseguinte tem-se o diâmetro.

Apesar dos resultados encontrados no processamento de dados *laser* apresentarem correspondência aos valores de diâmetro obtidos por métodos tradicionais, as metodologias propostas na literatura estão sujeitas a erros devido a influência de pontos que não correspondem a superfície do tronco da árvore.

Henning e Radtke (2006) concluíram que ao aplicar o método dos mínimos quadrados podem ocorrer superestimativas dos diâmetros quando existirem pontos de galhos ou copa. Já a ausência de dados que representam o tronco resulta em subestimação dos diâmetros.

Pode-se dizer que o maior entrave para aplicação de metodologias de obtenção de diâmetros e da modelagem tridimensional é a presença de pontos que não fazem parte da superfície do tronco da árvore no processamento.

2.4.5 Filtragem e modelagem de dados *laser scanner*

A natureza dos dados de varredura *laser scanner* é a de representar todos os objetos que estavam interpostos ao campo de visada do *laser*, sendo assim, a varredura de uma árvore será composta por galhos, pontos da superfície do solo e sub-bosque. Litkey *et al.*, (2008) e Liang *et al.*, (2008), indicam a necessidade da eliminação de dados que não fazem parte do tronco da árvore para a modelagem.

Partindo deste pressuposto, é indispensável o estabelecimento de metodologias que venham ao encontro da seleção de pontos da superfície que se pretende modelar. A geração de um modelo tridimensional acurado do fuste irá depender da qualidade dos dados disponibilizados para modelagem, sendo que o melhor modelo deverá ser alcançado trabalhando apenas com pontos que representem o tronco.

A filtragem pode ser empregada visando eliminar objetos isolados considerando um limiar de distância para ocorrência de pontos vizinhos, o valor de intensidade característica da superfície de interesse e a densidade de pontos em determinadas alturas da árvore (SIMONSE *et al.* 2003; ASCHOFF *et al.*, 2004).

Procedimentos semi-automatizados de filtragem são comumente empregados, ou seja, é realizada a eliminação de pontos que visualmente não pertencem ao tronco da árvore, onde o objetivo é realizar uma “limpeza” da superfície que será modelada.

Todavia, a filtragem visual do tronco é um método manual, estando sujeito a erros grosseiros por parte do usuário do *software* que necessita de muito tempo e cuidado ao editar o arquivo de pontos.

A automatização da filtragem dos dados é realizada por meio da programação computacional, onde a utilização da geometria analítica, regressão linear e ajustes de formas geométricas são encontradas na literatura.

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 desviassem 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.

A aplicação da regressão linear para selecionar dados e a grande semelhança da nuvem de pontos do tronco com formas geométricas representadas pela circunferência e o cilindro fizeram com que novas técnicas fossem desenvolvidas.

O ajuste de cilindros ao longo do fuste foi proposto por Pfeifer *et al.*, (2004) e Pfeifer e Winterhalder (2004). A nuvem de pontos (FIGURA 2a) é ajustada a cilindros ao longo do fuste (FIGURA 2b) tendo como eixo principal o centro de cada cilindro ajustado, definido pelo método dos mínimos quadrados (FIGURA 2c), o que resulta na separação de pontos que formam os galhos inseridos no tronco da árvore.

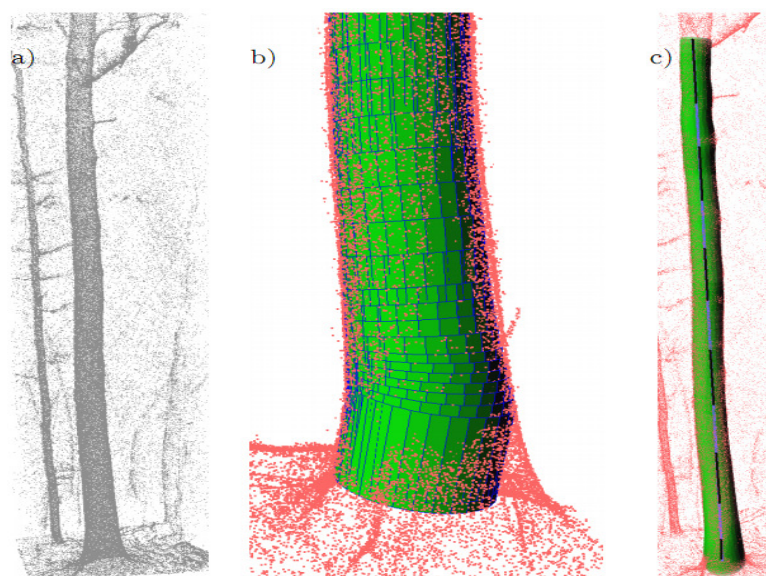


FIGURA 2 - MODELAGEM DO TRONCO. a) NUVEM DE PONTOS ORIGINAL; b) SEQUÊNCIA DE CILINDROS AJUSTADOS; c) EIXO MÉDIO DE CILINDROS E MODELAGEM DO TRONCO
 FONTE: Adaptado de PFEIFER E WINTERHALDER (2004)

No desenvolvimento da modelagem do fuste utilizando dados *laser scanner* terrestre, um método denominado “*Crescent moon*” foi desenvolvido por Király e Brolly (2007), o qual consiste em ajustar círculos em fatias de dados *laser* ao longo

do tronco, utilizando três pontos cardeais em relação ao centróide do *cluster*¹. O objetivo deste método é a filtragem de pontos considerados como *outliers*², resultando em um modelo composto por circunferências ajustadas ao longo do tronco. O método encontra problemas para realizar o ajuste na copa das árvores, sendo necessária a realização de estimativas através do ajuste de regressão.

Brolly e Király, (2009) utilizando formas geométricas em duas e três dimensões, para filtragem dos pontos que pertencem à superfície do tronco, descreveram um procedimento que trata da utilização do método de mínimos quadrados para minimizar a discrepância da distância euclidiana entre os pontos e limites das formas geométricas propostas.

A parametrização do círculo (Eq. 1) e cilindro (Eq. 2), segundo Brolly e Király, (2009), podem ser verificados abaixo:

$$\| \mathbf{c} - \mathbf{p} \| - r = 0 \quad (1)$$

Onde: \mathbf{c} é um vetor (X_c, Y_c) apontando para o centro do círculo;
 \mathbf{p} (X_p, Y_p) é um ponto sobre o círculo;
 r é o raio.

$$\| (\mathbf{a} - \mathbf{q}) \times \mathbf{n} \| - r = 0 \quad (2)$$

Onde: \mathbf{a} é um ponto (X_a, Y_a, Z_a) no eixo;
 \mathbf{q} é um ponto (X_q, Y_q, Z_q) no cilindro,
 \mathbf{n} (X_n, Y_n, Z_n) é a direção do eixo.

O critério utilizado para a filtragem dos dados é a similaridade entre pontos, baseado na distância euclidiana. A seleção resulta em *clusters* de dados que podem representar a superfície do tronco.

¹ *Cluster*: Conjunto de pontos agrupados em determinada altura da árvore.

² *Outliers*: Pontos que estão localizados fora da tendência linear.

As formas geométricas foram ajustadas para o conjunto de pontos, em duas (círculo) e três dimensões (cilindro) por meio da implementação do método dos mínimos quadrados, objetivando minimizar as discrepâncias da distância euclidiana entre as medições e os limites das formas geométricas propostas. Este procedimento suprimiu os efeitos dos pontos espalhados sobre os parâmetros de formas geométricas.

Algoritmos para a modelagem da área transversal de fatias ao longo do fuste foram propostos pelos autores Pereira e Pereira (2009) e Király e Brolly (2010), cabe-se destacar o método denominado de *Free Form Polygon (FFP)*. A FIGURA 3 representa a implementação do método proposto.

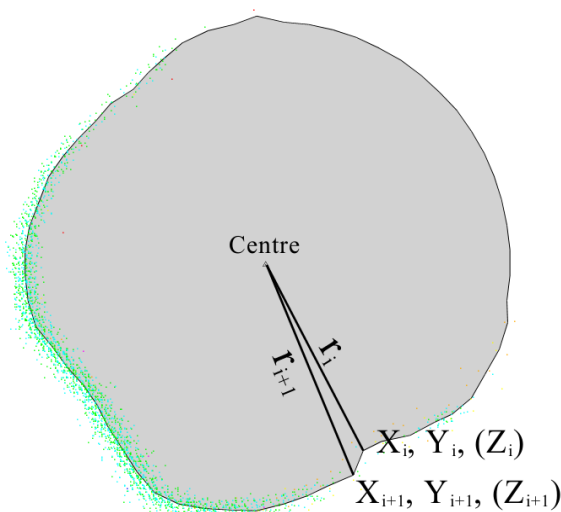


FIGURA 3 - MÉTODO *Free Form Polygon (FFP)*
 FONTE: Adaptado de KIRÁLY E BROLLY (2010)

Como pode ser visualizado na FIGURA 3 o procedimento consiste em selecionar pontos localizados a uma distância mínima sob um azimute do centro otimizado para uma fatia de pontos em determinada altura do tronco da árvore. Ao se trabalhar a aplicação do método (*FFP*) para o delineamento da área transversal é possível obter apenas pontos que fazem parte do tronco da árvore, realizando assim, em conjunto com a modelagem, a filtragem de dados que não correspondem ao fuste.

Em espaço tridimensional (*voxel space*) para prover dados dendrométricos de *Pinus ponderosa* e *Abies grandis*, o uso dos dados *laser* foi estudado por

Gatziolis et al. (2010), os quais encontraram erro absoluto inferior a 2% para o volume da árvore, recomendando a utilização de visadas múltiplas e maior densidade de pontos para esta variável.

Um modelo tridimensional acurado pode ser obtido utilizando a técnica de triangulação entre pontos (ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004), porém é necessário que a nuvem de pontos seja trabalhada para remoção de dados que não fazem parte da superfície de interesse.

A aplicação da modelagem tridimensional para obtenção do volume do tronco da árvore esta sujeita aos limites do alcance da medição *laser*. Nas partes superiores da árvore a copa é composta por folhas que atuam como obstáculo à chegada do pulso *laser* até o tronco. A ausência de pontos que representam a superfície do tronco inviabiliza a modelagem.

3 MATERIAL E METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de *Pinus* spp., objeto do presente estudo, está situada no município de Curitiba - PR, mais precisamente localizada no Campus III da Universidade Federal do Paraná - UFPR (FIGURA 4).

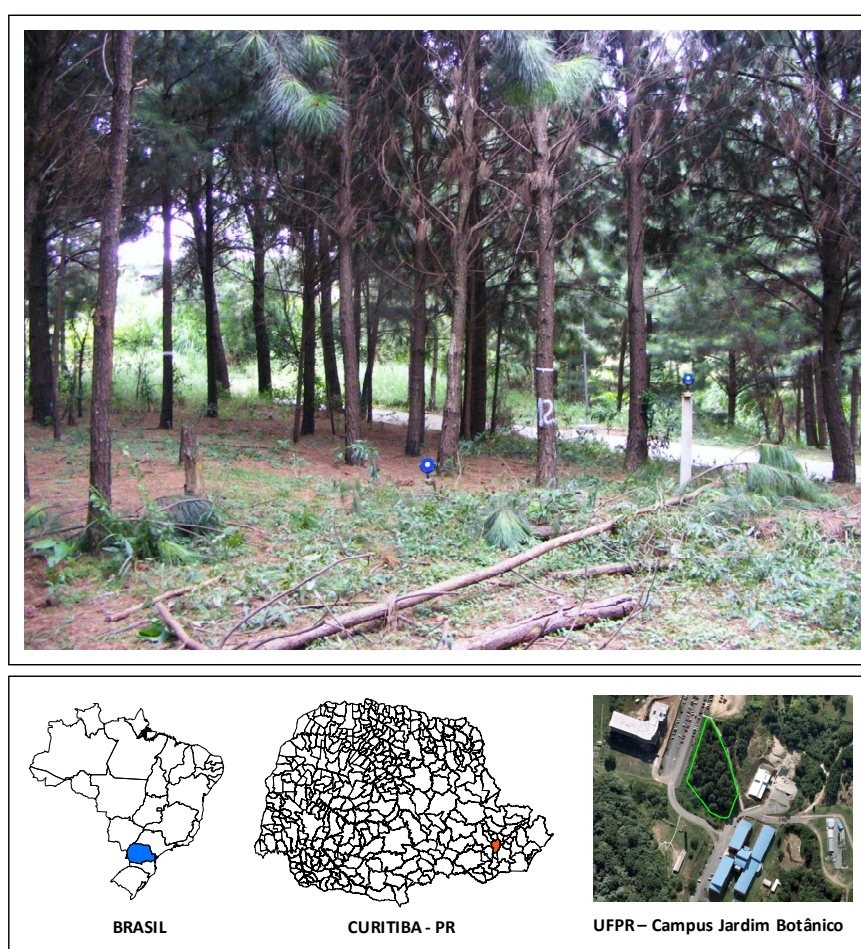


FIGURA 4 - ÁREA DE ESTUDO
FONTE: O Autor (2012).

O local apresenta árvores provenientes da dispersão de sementes de indivíduos próximos, sendo estabelecido ali um povoamento inequiâneo, caracterizado pela ausência de tratos silviculturais, espaçamento irregular entre árvores e densidade heterogênea.

Neste local o gênero *Pinus* spp. está representado pelas espécies de *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm.. As árvores possuem aproximadamente 14,5 metros de altura e 20 centímetros de diâmetro a altura do peito.

A dispersão de sementes anemocórica fez com que a disposição dos indivíduos não seguisse um espaçamento regular ocasionando, em algumas partes, a aglomeração de árvores. A tortuosidade do tronco é um aspecto que chama atenção neste povoamento.

Em determinadas alturas da copa, próximo ao ápice do tronco, é comum encontrar árvores adjacentes que se tocam, tornando complicada a distinção visual entre os indivíduos.

As árvores estabelecidas neste povoamento apresentam galhos espessos e acículas secas no início da copa e em sua parte superior ocorre a abundância de acículas ainda verdes.

Estes atributos fizeram com que as árvores estudadas representassem um conjunto de situações como: tortuosidade, galhos, acículas secas e verdes, interposição de árvores adjacentes, às quais o algoritmo proposto para a filtragem deve superar e conseguir manter as características do tronco da árvore.

3.2 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DO PROJETO

Três etapas consideradas essenciais ao desenvolvimento do trabalho foram definidas no planejamento deste estudo: coleta, processamento e análise de dados.

Cada etapa definida no planejamento é caracterizada por atividades que foram organizadas de forma a otimizar o trabalho de campo e de escritório, cujo fluxograma é apresentado na FIGURA 5.

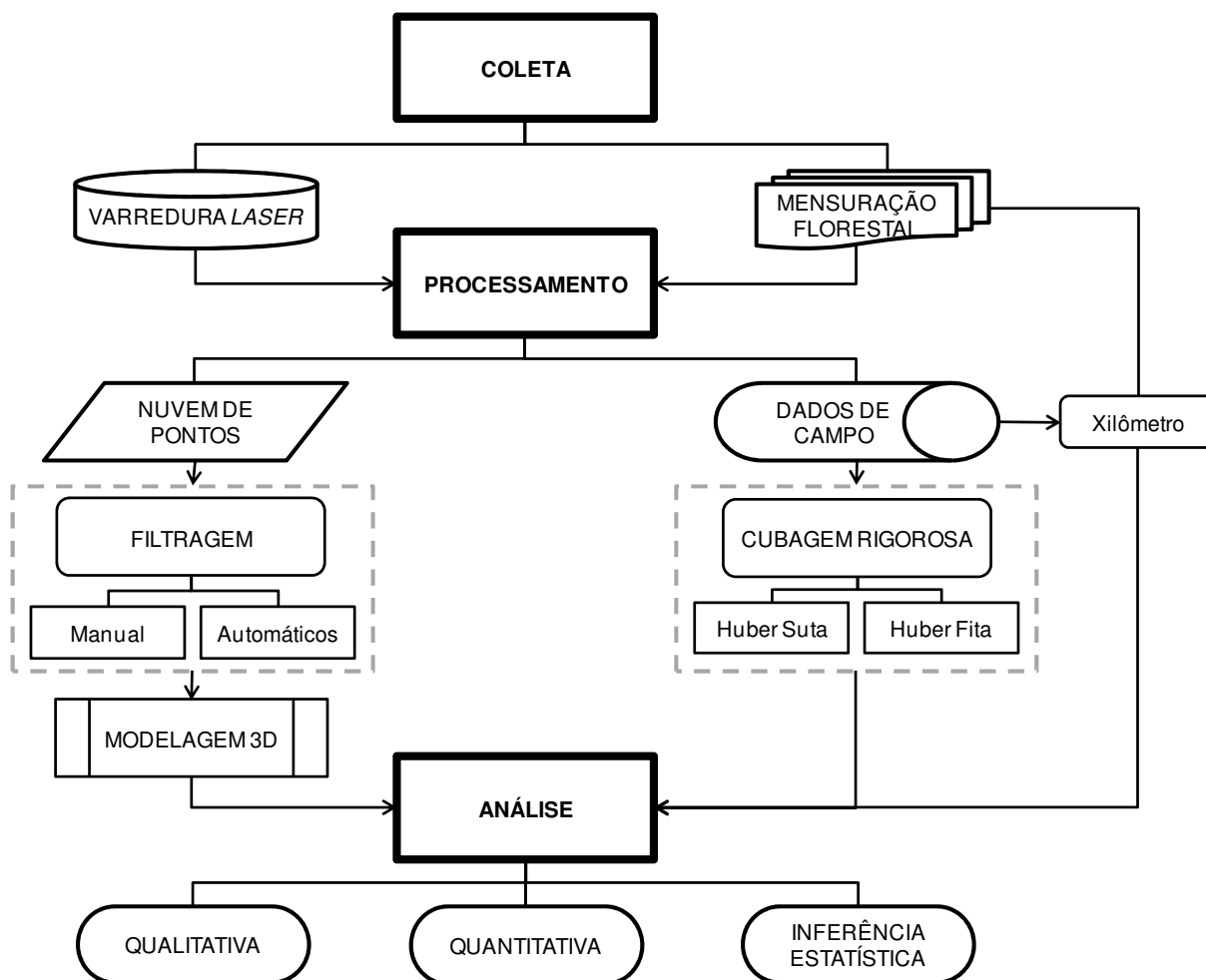


FIGURA 5 - FLUXOGRAMA DE TRABALHO
 FONTE: O Autor (2012).

3.3 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO LASER

3.3.1 Laser scanner Terrestre

O equipamento utilizado foi o *laser scanner* terrestre disponibilizado pelo Departamento de Geologia da UFPR, modelo Leica HDS 3000 (FIGURA 6), fabricado pela *Cyra Technologies*, hoje *Leica Geosystems*.



FIGURA 6 - LASER SCANNER TERRESTRE *CyraX HDS3000*
 FONTE: Adaptado de GRIDPOINT SOLUTIONS (2011).

O HDS 3000 tem sistema de varredura estático. Seu princípio de medida a *laser* se baseia no intervalo de tempo decorrido desde o instante da emissão do pulso até o instante do retorno do mesmo. Um resumo das principais características técnicas do equipamento é apresentado no QUADRO 3.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS CyraX HDS 3000	
Taxa de aquisição de pontos	1800 pontos/segundo
Espaçamento mínimo entre pontos	1,2mm
Máximo de pontos por coluna	20000
Máximo de pontos por linha	5000
Distância mínima de operação	1 m
Distância máxima de operação	100 m
Acurácia posicional	6 mm *
Acurácia distância	4 mm *
Acurácia angular	60 micro-radianos

QUADRO 3 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CYRAX HDS 3000
 FONTE: Adaptado de LEICA SCANSTATION HDS3000 - USER MANUAL (2006)

* específico para distâncias de até 50 metros.

O comprimento de onda *laser* produzido pelo equipamento *CyraX HDS3000* é de 532 nanômetros, espectro visível de cor verde, classificado como *Laser 3R* de acordo com: IEC 60825-1 (*International Electrotechnical Commission*) que dispõe sobre “Segurança de Produtos *Laser*”. De acordo com o padrão IEC o *laser* da classe 3R é seguro quando manipulado com cuidado e potencialmente perigoso aos olhos se observado por meio de instrumentos óticos.

Os pulsos *laser* são gerados e emitidos pelo sistema com o auxílio de um espelho de varredura que direciona o *laser* para as janelas de abertura localizadas na parte frontal e superior do equipamento (FIGURA 7).

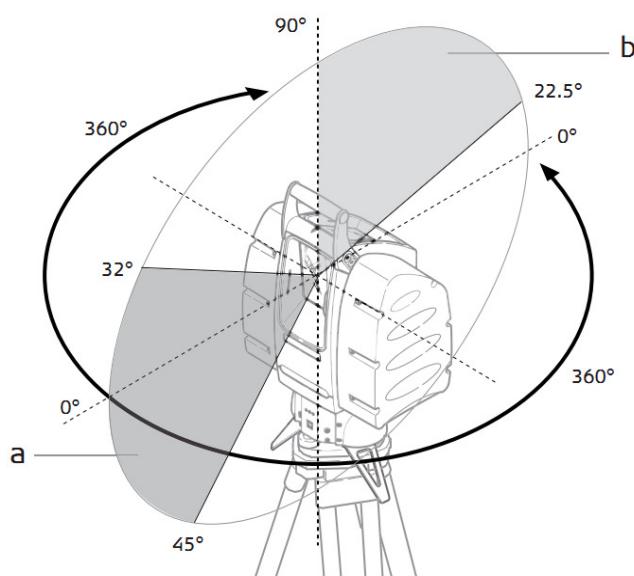


FIGURA 7 - CAMPO DE VISADA DO *LASER*
 FONTE: LEICA SCANSTATION HDS3000 - USER MANUAL (2006)

A janela principal (a) permite a obtenção de dados compreendidos entre os limites de 45 graus abaixo e 32 graus acima da linha horizontal traçada em relação ao seu centro. A janela superior (b) possibilita a coleta de dados de 22,5 graus acima da linha horizontal até o zênite (90°).

Diante do exposto e da possibilidade de realização de um giro completo em torno do eixo onde foi instalado, têm-se um *Field of View – FOV* (campo de visada) que abrange 360 x 270 graus.

Equipado com uma câmera fotográfica integrada é possível escolher a área onde se deseja realizar a varredura e iniciar a coleta de dados do objeto de

interesse. Em curto espaço de tempo são geradas coordenadas tridimensionais de pontos e registrada a intensidade do sinal de retorno de determinada superfície.

Para que seja possível realizar a coleta de dados utilizando o *laser scanner* HDS3000 é necessário um conjunto de instrumentos designados como componentes do sistema (FIGURA 8).

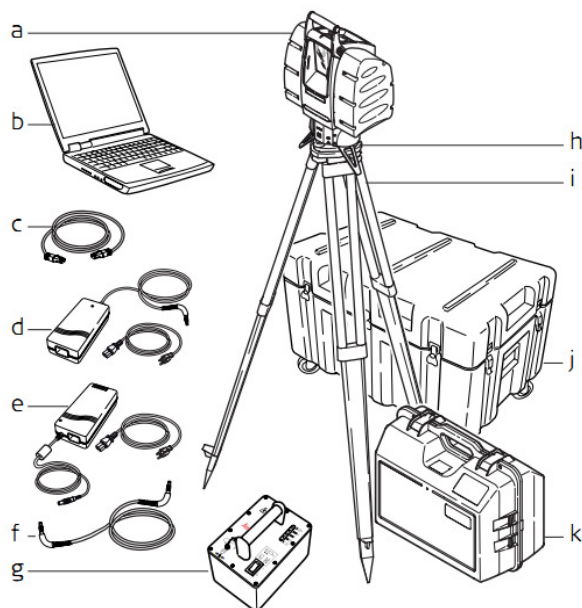


FIGURA 8 - COMPONENTES DO SISTEMA *LASER SCANNER* HDS 3000
 FONTE: LEICA SCANSTATION HDS3000 - USER MANUAL (2006)

De acordo com a legenda apresentada na ilustração a utilidade de cada componente será descrita a seguir:

- a) HDS3000 → equipamento *laser scanner* terrestre
- b) Computador portátil → controla o *laser scanner*;
- c) Cabo de Rede → estabelece comunicação *laser*/computador;
- d) Carregador de bateria → energia para bateria;
- e) Fonte de alimentação → energia direta para o equipamento;
- f) Cabo de força → liga a bateria ao *laser*;
- g) Bateria → fornece energia ao sistema;
- h) Tripé → suporte para sustentação do aparelho no local de varredura;
- i) Caixa de transporte HDS3000 → proteção para transporte do *laser*;
- j) Caixa de transporte → proteção para acessórios.

O modelo *CyraX HDS3000* pesa aproximadamente 17 kg e apresenta dimensões de 265 mm de profundidade, 370 mm de largura e 510 mm de altura. A bateria pesa em torno de 12 kg e suas dimensões são 165 mm de profundidade, 236 mm de largura e 215 mm de altura.

Em campo, o *laser scanner* é instalado sob um tripé topográfico e tem sua operação controlada via *software* executado de um computador portátil. Os comandos enviados ao equipamento e o recebimento de dados são transmitidos por meio de um cabo de rede que estabelece comunicação através de um endereço estático de *Internet Protocol* (IP).

Atualmente os novos equipamentos *laser scanner* terrestre apresentam a mesma precisão, porém, modificações em sua estrutura trouxeram melhorias na velocidade de coleta de dados e operacionalização em campo. Dentre os aperfeiçoamentos cabe destacar: o aumento da taxa de aquisição de pontos; a considerável redução no tamanho das baterias, que agora estão alocadas dentro do equipamento; o controle e armazenamento diretamente realizados no *laser scanner* terrestre, sendo dispensado o computador portátil.

3.3.2 Alvos

Os alvos são acessórios fornecidos pela *Leica Geosystems* para operar em conjunto com a estação *laser*. Sua utilização está ligada ao tipo de trabalho que se pretende realizar, o que não o constitui elemento obrigatório para coleta de dados.

Quando existe a necessidade de georreferenciamento da nuvem de pontos ou realização de varredura múltipla para recobrir o objeto de interesse, torna-se indispensável a instalação dos alvos no campo de varredura *laser*.

Os modelos de alvos utilizados nesta pesquisa são do tipo *Tilt & Turn target* (FIGURA 9). O modelo de superfície quadrada possui lados de 0,0762 metros, e o de superfície circular apresenta 0,1524 metros de diâmetro. Como seu próprio nome descreve, são passíveis de inclinação e rotação.

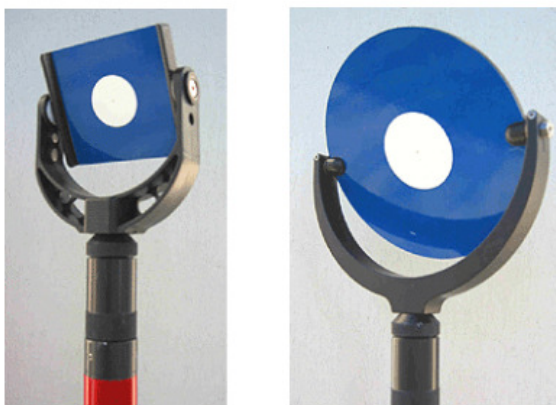


FIGURA 9 - ALVOS UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO *LASER* - *Tilt & Turn target*
 FONTE: LEICA ACESSÓRIOS (2011)

As cores características (azul e branco), devido a diferenças de reflectância entre a superfície do alvo e a parte central, facilitam a identificação dos alvos em ambiente computacional e permitem a realização da união de nuvem de pontos com precisão.

3.3.3 Computador portátil

O computador portátil garante a operação do instrumento HDS3000 e armazena os dados coletados pelo instrumento. Os requisitos mínimos de *hardware* e *software* podem ser verificados no QUADRO 4.

COMPONENTE	REQUISITOS MÍNIMOS
Processador	1,4 GHz
Memória-RAM	512 MB
Disco Rígido	40 GB
Rede	Ethernet
Vídeo	SXGA
Interface de usuário	<i>Software Cyclone</i>
Sistema Operacional	Windows XP

QUADRO 4 - REQUISITOS MÍNIMOS PARA O COMPUTADOR PORTÁTIL
 FONTE: ADAPTADO DE LEICA SCANSTATION HDS3000 - USER MANUAL (2006)

Na interface do *software* específico (*Cyclone*) é possível tomar fotografias da área, delimitar a janela de varredura, realizar ajustes de resolução da medição *laser* e armazenar os dados em uma arquitetura apropriada para a nuvem de pontos.

Para garantir os procedimentos em campo algumas simples e convenientes recomendações podem ser elencadas:

1. A utilização do computador portátil em modo "economia de energia" para ampliar o tempo útil da bateria;
2. A desativação dos modos automáticos de hibernação e desligamento do sistema operacional para evitar a interrupção do armazenamento dos dados;
3. Necessidade de uma bateria reserva para o computador portátil para substituição durante o levantamento em campo.

3.4 INSTRUMENTOS PARA MENSURAÇÃO FLORESTAL

3.4.1 Suta e fita métrica

Os diâmetros do tronco foram medidos utilizando suta modelo Haglof-Mantax de 500 mm e as circunferências tomadas com a fita métrica de 150 cm. Estes instrumentos foram escolhidos por serem utilizados convencionalmente na cubagem de árvores.

Ao empregar estes diferentes instrumentos de mensuração, deve-se admitir que erros conceituais inerentes às formulações matemáticas de cálculo de área transversal podem ocorrer devido às irregularidades na forma da seção medida.

Sabe-se que os dois instrumentos tendem a causar superestimativas quando se trata de valores para área transversal de seções excêntricas, ocasionando um desvio que irá influenciar diretamente os resultados de volume obtidos por fórmulas de cubagem.

A fita métrica também foi utilizada para a medição da altura total das árvores derrubadas e da altura parcial para encontrar o ponto de medição de diâmetros para as seções em que a árvore foi dividida.

3.4.2 Hipsômetro Vertex

A altura total das árvores em pé foi medida utilizando o Hipsômetro Vertex IV, que é composto por duas partes distintas: receptor-transmissor (*transponder*) e o hipsômetro (FIGURA 10).



FIGURA 10 - HIPSÔMETRO VERTEX IV
FONTE: ELOFORTE (2011)

O hipsômetro opera em conjunto com o receptor ultrasom para medição de distâncias. Ângulos referentes à inclinação do aparelho são obtidos com o auxílio de um sistema mecânico incorporado no hipsômetro.

A altura da árvore é então obtida indiretamente por meio da relação trigonométrica entre a distância do hipsômetro ao *transponder* fixado na árvore em altura pré-estabelecida, e do ângulo de inclinação deste ponto a ponta da copa, sendo o resultado apresentado diretamente na tela do instrumento.

3.4.3 Xilômetro

O volume verdadeiro do tronco, valor paramétrico, pode ser alcançado utilizando o método do deslocamento de água. O instrumento utilizado para este fim é designado na Engenharia Florestal como “Xilômetro”.

O princípio do método pode ser entendido de acordo com o seguinte raciocínio: em um recipiente onde o volume inicial de água (pré-imersão do torete) é estabelecido e determinado por certo nível, é possível verificar a mudança de altura da água na escala graduada (pós-imersão do torete) e obter o volume pela quantidade de água deslocada (FIGURA 11) aplicando a Equação 1.

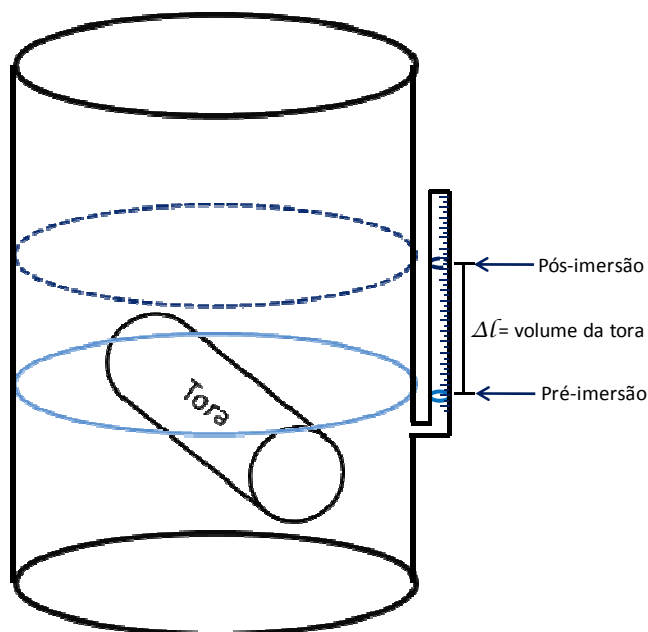


FIGURA 11 - FUNCIONAMENTO DO XILÔMETRO.
FONTE: O Autor (2012).

$$V_t = V_{i+t} - V_i \quad (3)$$

Onde:

V_t : volume do torete;

V_{i+t} : volume pós imersão do torete;

V_i : volume inicial de água.

O instrumento disponibilizado para o estudo foi cedido pelo laboratório de dendrometria da UFPR. Este equipamento consiste em um cilindro construído pela junção de dois tonéis, totalizando 400 litros de volume. A escala graduada em decímetro cúbicos (litros) foi impressa em um quadro de alumínio, montado ao lado do xilômetro. Dentro do quadro existe um tubo de plástico transparente conectado a uma saída de água. O deslocamento do líquido pela imersão do torete é verificado no tubo plástico referenciado pela escala graduada.

3.5 SOFTWARES

3.5.1 Software "Cyclone 5.1"

O Cyclone™ 5.1 é um software de visualização e manipulação de dados oriundos de sistemas *laser scanner* de medição. Permite, com rapidez e precisão, visualizar, navegar e avaliar objetos do mundo real em ambiente tridimensional.

Sua estrutura é dividida em módulos, provendo ao usuário da nuvem de pontos amplo conjunto de ferramentas de edição e proporcionando flexibilidade às mais diversas aplicações que a estação *laser scanner* esteja submetida.

Para realização da coleta e manipulação de dados *laser* utilizando a plataforma *Cyclone 5.1* são necessários que estejam habilitados os seguintes módulos: *Cyclone-SCAN*, *Cyclone-REGISTER*, *Cyclone-MODEL* e *Cyclone-VIEWER*.

O módulo *Cyclone-SCAN* é a interface de software que permite operar o equipamento HDS3000. Através deste módulo é possível definir as configurações do *scanner* para a coleta de dados, tais como: área de interesse, distância do equipamento ao objeto, densidade de pontos, armazenamento dos dados e tempo necessário para a varredura *laser*.

Com o *Cyclone-REGISTER* é feita a união de nuvens de pontos capturadas a partir de diferentes estações *laser*, desta forma, é definido um sistema de coordenadas comum à varredura múltipla.

Um módulo versátil que permite a extração de informações diretamente da nuvem de pontos e também através de modelagem 3D é encontrado no *Cyclone-MODEL*.

Dentre os módulos citados, o único disponível gratuitamente (licença livre) é o *Cyclone-VIEWER*, este, tem sua funcionalidade restrita a visualização e seleção da nuvem de pontos no software *Cyclone*.

A arquitetura *Object Database, Client/Server* do *Cyclone*, banco de dados próprio do software, permite gerenciar uma grande quantidade de dados *laser* de forma eficiente, segura e de fácil acesso.

Os dados armazenados podem ser exportados em diferentes formatos compatíveis à *softwares* de topografia e desenho assistido por computador, sendo ainda disponibilizado a opção do formato texto.

De forma análoga, os dados também podem ser importados para o software, podendo ser trabalhado com nuvem de pontos obtida por diferentes equipamentos ou dados que tenham sido processados em outros *softwares*.

3.5.2 *Softwares* "Microsoft Office Excel" e "Visual Basic for Applications"

O *Microsoft® Office Excel* é um programa de planilha eletrônica. Seus recursos incluem ferramentas de cálculo, análise de dados, construção de gráficos, otimização e programação de aplicações utilizando *Visual Basic for Applications* (VBA).

Softwares que incluem em sua estrutura o VBA são conhecidos como aplicativos personalizáveis, ou seja, podem ser ajustados de acordo com as necessidades específicas do usuário.

Incorporado aos programas do pacote *Office*, o VBA é uma implementação do *Visual Basic* que está disponível para realização de aplicações baseadas na estrutura do programa anfitrião.

O VBA fornece um IDE (ambiente de desenvolvimento integrado) que oferece aos desenvolvedores uma janela de projetos, janela de propriedades e ferramentas de depuração, bem como suporte para o *Microsoft® Forms*, que trata da criação de caixas de diálogo personalizadas e controles para concepção de

interfaces do usuário. Sua estrutura permite criar rotinas em módulos, funções e ainda realizar gravação de uma seqüência de comandos estabelecida pelo usuário.

Por ser funcional e extremamente flexível na utilização de ferramentas e bibliotecas incorporadas no *Excel*, o VBA foi utilizado para a implementação de rotinas (via linguagem de programação) e o desenvolvimento de interfaces de controle e manipulação de parâmetros dos algoritmos por parte do usuário.

Como o nome sugere, o VBA é muito parecido com o *Visual Basic*, tendo como principal diferença a limitação de rodar código apenas dentro da aplicação, em vez de poder ser executado como um aplicativo separado.

3.5.3 Software "3DReshaper Application"

3DReshaper Application ® é um *software* de processamento da nuvem de pontos para usuários finais. Disponibiliza ferramentas de extração de informações métricas da nuvem de pontos, modelagem tridimensional, e opções de interação com CAD.

A visualização é otimizada através de diferentes tipos representação dos dados. O usuário pode escolher entre o modo textura, que permite a visualização e carregamento rápido, e o modo inspeção, qual possibilita a manipulação e edição da nuvem de pontos.

Apesar de não ser desenvolvido para o meio florestal, a versão padrão do *3DReshaper* fornece uma ampla gama de recursos para se trabalhar com a nuvem de pontos de uma árvore, cabendo destaque as malhas tridimensionais, extração de contornos e formas, criação de linhas e figuras geométricas.

A modelagem tridimensional por meio de malhas é realizada utilizando modelos de triangulação de pontos e o resultado final é um protótipo do tronco que permite a extração de informações de medidas lineares, área e volume.

3.5.4 Softwares estatísticos

Os testes estatísticos foram aplicados utilizando pacotes estatísticos livres, disponibilizados por instituições de ensino superior.

3.5.4.1 Assistat

O Assistat é um pacote de assistência estatística. Foi desenvolvido pelo Prof. Dr. Francisco de Assis Santos e Silva da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e contém uma série de análises estatísticas disponíveis ao usuário. Sua aplicação foi específica para realização do teste de homogeneidade de variâncias (Teste de Bartlett). A versão do programa utilizado é a 7.6 beta (2011), disponibilizada gratuitamente no site do *software*.

3.5.4.2 Sisvar

O Sisvar é um programa de análises estatísticas e planejamento de experimentos. Foi desenvolvido para fins didáticos pelo professor Dr. Daniel Furtado Ferreira, que, posteriormente, para atender a comunidade científica, ampliou o programa para realização de análise de dados oriundos de pesquisas científicas (FERREIRA, 2008).

Sua utilização neste trabalho é direcionada a realização da análise de variância, e aos testes estatísticos de significância para comparação de médias (teste *F* e teste de *Tukey*) configurados dentro de um delineamento experimental de blocos ao acaso.

Atualmente o *software* é uma marca registrada da Universidade Federal de Lavras - UFLA. A versão utilizada foi a 5.3 (compilação 75), que encontra-se disponível gratuitamente no site do departamento de Ciências Exatas desta mesma universidade.

3.6 COLETA DE DADOS

O trabalho de coleta de dados teve início com uma expedição em campo onde foi realizado o reconhecimento da área e o levantamento de informações relevantes à caracterização das árvores do povoamento.

De acordo com o observado em campo, um grupo de 12 árvores foram escolhidas para a medição *laser* e mensuração florestal, tendo como parâmetro de seleção os seguinte critérios técnicos:

- 1 - distribuição dos indivíduos em classes diamétricas;
- 2 - facilidade para obtenção de dados *laser* em toda superfície da árvore;

A "distribuição dos indivíduos em classes diamétricas" teve como intuito controlar a variação dos dados para que fosse possível a aplicação coerente dos testes estatísticos.

A descrição da estrutura do povoamento e as características inerentes às árvores do local remetem ao critério "facilidade para obtenção de dados *laser* em toda superfície da árvore". Este pode ser entendido como a alocação do equipamento para prover um campo de visada do *laser* que satisfaça a condição de aquisição do maior número de pontos da árvore de interesse.

Os doze indivíduos foram numerados (1 a 12) próximos à base do tronco, e mensurados com a árvore em pé utilizando a fita métrica, suta e o hipsômetro Vertex. As variáveis dendrométricas tomadas foram: diâmetro a altura do peito, circunferência a altura do peito, altura do início da copa e altura total. Os dados obtidos constituíram a mensuração pré-corte (TABELA 1).

TABELA 1 - MENSURAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS PRÉ-CORTE.

Árvore	SUTA (cm)			FITA (cm)		HIPSÔMETRO (m)	
	$d_{(1)}$	$d_{(2)}$	$d_{(m)}$	c	d	h	$h_{(copa)}$
1	17,1	18,2	17,7	56,8	18,1	15,2	3,8
2	14,5	14,3	14,4	46,8	14,9	14,1	-
3	9,7	10,0	9,9	31,0	9,9	11,0	3,8
4	11,9	12,3	12,1	40,0	12,7	14,1	5,0
5	11,5	11,6	11,6	37,8	12,0	14,3	5,2
6	15,3	15,6	15,5	49,2	15,7	14,1	4,7
7	17,8	18,0	17,9	57,8	18,4	17,7	5,4
8	12,6	12,3	12,5	40,0	12,7	12,4	5,2
9	10,5	9,8	10,2	32,5	10,3	14,5	6,2
10	18,0	18,0	18,0	58,0	18,5	15,3	5,2
11	15,8	15,3	15,6	49,2	15,7	14,1	4,8
12	17,4	18,0	17,7	56,5	18,0	15,2	4,9

FONTE: O Autor (2012).

$d_{(1)}$ - primeira medição do diâmetro com a suta; $d_{(2)}$ - segunda medição do diâmetro com a suta; $d_{(m)}$ - média aritmética dos diâmetros medidos com a suta; c - circunferência do tronco; d - diâmetro obtido da circunferência; h - altura total da árvore; $h_{(copa)}$ - altura de início da copa.

As informações do inventário pré-corte permitiram atestar a viabilidade do estudo com as árvores selecionadas, sendo plausível proceder com a coleta de dados utilizando os diferentes instrumentos para medição.

O comportamento dos dados na relação hipsométrica apresenta a característica de um povoamento estagnado. Diante do exposto é possível constatar que o conjunto de indivíduos selecionados apresentará árvores com valores próximos para variável altura mesmo se tratando de classes diamétricas distintas.

Inicialmente foi realizada a varredura *laser scanner* para cada indivíduo. Após esta etapa, ocorreu o corte das árvores para mensuração de diâmetros ao longo do tronco. Por fim, foi obtido o valor paramétrico do volume por meio do método de deslocamento de água.

3.6.1 Varredura *laser*

A varredura *laser* consistiu a aquisição de dados pontuais de toda superfície da árvore, tendo como produto uma nuvem de pontos de coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) das feições presentes no campo de visada do *laser*.

Em campo foi empregado o procedimento de levantamento de dados utilizando duas a três estações com o equipamento *laser scanner* para constituir a varredura múltipla de árvore individual (FIGURA 12).

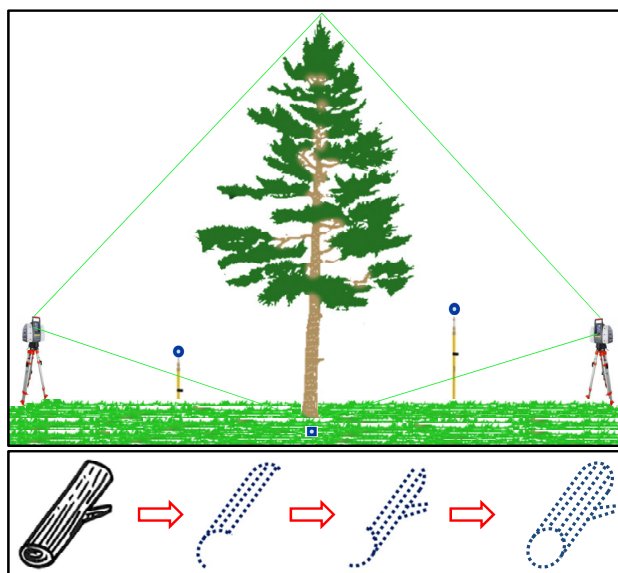


FIGURA 12 - VARREDURA MÚLTIPLA DE DADOS *LASER* PARA ÁRVORE INDIVIDUAL.
FONTE: O Autor (2012).

Este procedimento foi adotado visto que na varredura simples a aquisição dos dados é de apenas parte do indivíduo, enquanto que na varredura múltipla é possível obter a árvore completa (THIES e SPIECKER, 2004) e reconstituir toda sua superfície ou parte desta por meio dos dados pontuais coletados (FIGURA 12).

O equipamento foi alocado de forma a proporcionar a aquisição da maior quantidade de dados da árvore presente no campo de visada do *laser*. A distância do equipamento em relação à árvore foi equivalente à altura total da árvore a ser medida, salvo em situações em que a estação teve de ser posicionada para recobrir determinado detalhe que não tenha sido contemplado pelas estações anteriores.

A decisão do número de varreduras levou em consideração a disposição do indivíduo no povoamento, o encobrimento por árvores próximas e a acessibilidade do local onde deveria ser instalado o equipamento. A FIGURA 13 permite verificar o procedimento de varredura múltipla utilizando duas estações *laser*.

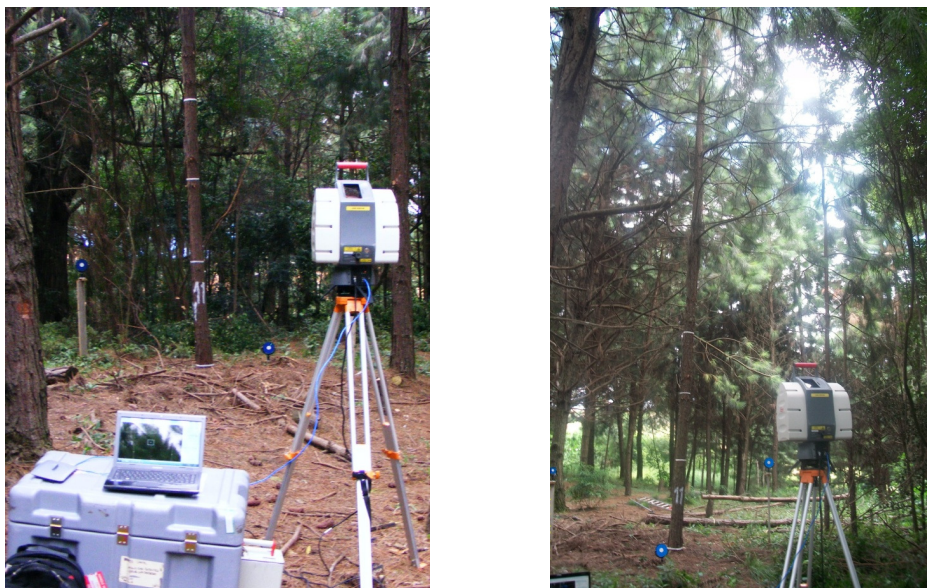


FIGURA 13 - PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS UTILIZANDO DUAS ESTAÇÕES *LASER*
FONTE: O Autor (2012).

Nesta ilustração pode ser observada a presença de alvos (*Tilt & Turn target*) posicionados em pontos estratégicos, de comum visualização às estações *laser*, com intuito de subsidiar o agrupamento do conjunto de dados em único sistema de coordenadas.

Como os alvos são a referência espacial para união das varreduras é necessário que se tome alguns cuidados quanto a sua instalação e medição:

- Priorizar superfícies seguras que forneçam estabilidade e mantenham à base do alvo imóvel;
- Fazer a distribuição dos alvos contemplando diferentes posições nos eixos (x, y, z);
- Realizar a medição em intervalo de pontos menos espaçados nas superfícies dos alvos;

Desta forma, optou-se por utilizar um conjunto mínimo de três alvos distribuídos na cena de varredura e resolução de 0,001m, para permitir que a fase posterior de registro da nuvens de pontos fosse feita com precisão.

Os parâmetros (resolução e "range") utilizados na coleta de dados das árvores foram adotados preconizando a obtenção de pontos que recobrissem a maior parte do tronco e inclusive representasse a altura total da árvore (QUADRO 5).

ÁRVORE	VARREDURAS _(nº)	RESOLUÇÃO _(m)		RANGE _(m)	
		HORIZONTAL	VERTICAL		
1	2	0,005	0,005	15	
2					
3					
4					
5					
6					
7	3	0,005	0,010	12	
9					
10					
8	2				
11	3				
12					

QUADRO 5 - PARÂMETROS DE VARREDURA *LASER SCANNER* UTILIZADOS.
FONTE: O Autor (2012)

O parâmetro "range" garante que existirá pelo menos 1 ponto da resolução pré-definida para determinada distância (12 a 15 m). Tomando como exemplo a árvore sete, a qual apresenta os seguintes parâmetros: resolução horizontal de 0,005 m, resolução vertical de 0,010 m e "range" de 15 m, ter-se-á dados pontuais espaçados de 0,005 m por 0,010 m à uma distância de 15 metros do equipamento.

Com o instrumento HDS3000 e os parâmetros de varredura adotados, o tempo necessário para recobrir uma árvore, desde a instalação do equipamento até a finalização da coleta de dados, foi de aproximadamente 25 minutos por estação *laser*, sendo assim, 50 minutos para árvores utilizando duas varreduras e 75 minutos para árvores medidas por três estações.

A tomada de dados *laser* foi realizada para as doze árvores durante o mês de fevereiro e março de 2011. Por se tratar de um sensor ativo, cabe destacar que foi possível operá-lo em condições de tempo adversas. No entanto a precipitação (chuva) e fortes ventos influenciaram no desempenho da coleta de dados em campo.

3.6.2 Mensuração Florestal

A mensuração florestal teve como objetivo o levantamento de variáveis dendrométricas para a aplicação do método de cubagem rigorosa e a obtenção do valor paramétrico de volume da árvore pela técnica do deslocamento de água.

Para obter o volume pela técnica de deslocamento de água foi necessário derrubar a árvore e dividir o tronco em seções que facilitassem a operacionalização no Xilômetro (FIGURA 14).



a



b



c



d

FIGURA 14 - OPERAÇÕES DE COLHEITA: (a) CORTE, (b) DESGALHAMENTO, (c) TRAÇAMENTO, (d) TRANSPORTE DE TORETES.
FONTE: O Autor (2012)

Um limite métrico para a realização do corte da árvore foi padronizado para que a altura do início da primeira tora correspondesse a 0,10 m do chão. A operação de desgalhamento exigiu perícia ao operar a motosserra para que durante o desgalhe mecanizado não fosse removida a casca ou danificado o torete.

Seções de um metro de comprimento até a altura total da árvore foram definidas para o traçamento do tronco. Uma medida de "gabarito"³ foi confeccionada com intuito de uniformizar o tamanho das toras.

O transporte até o local, onde posteriormente seria instalado o xilômetro, foi realizado de forma manual com o auxílio de um carrinho para o transporte de madeira. Cada tora foi devidamente identificada com tinta *spray* branca pelo correspondente número da árvore e a sua posição no tronco.

As toras foram medidas utilizando a suta *Mantax* para medição de diâmetros e a fita métrica para mensuração de circunferências. Foram tomadas medidas na metade da seção das toras de um metro de comprimento (FIGURA 15).

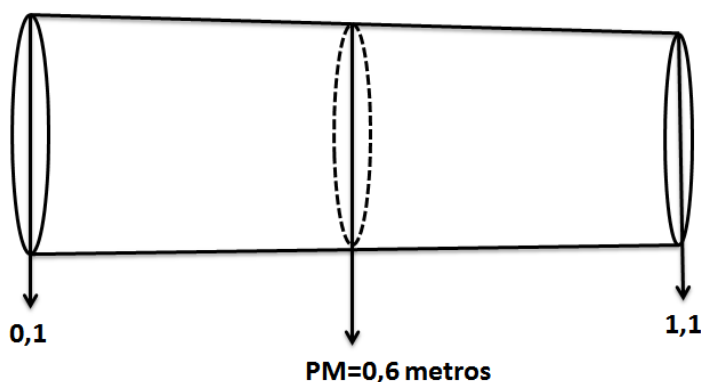


FIGURA 15 - PONTO DE MEDIÇÃO (PM) DE DIÂMETROS E CIRCUNFERÊNCIAS - TORA 1
 FONTE: O Autor (2012)

O valor paramétrico para a variável volume do tronco foi alcançado pela técnica de deslocamento de água realizando a imersão dos toretes no Xilômetro (FIGURA 16).

³ Gabarito: Peça de madeira tomada como referência para o corte de toras.



FIGURA 16 - IMERSÃO DA TORA NO XILÔMETRO E ESCALA GRADUADA (dm^3)
FONTE: O Autor (2012)

Neste procedimento as toras eram colocadas, uma de cada vez, dentro do tonel de água e com auxílio da escala graduada em decímetros cúbicos (dm^3) conferia-se o volume de água deslocado pela tora. O volume de cada tora foi obtido pela aplicação da Equação 1. O somatório dos volumes das seções (toras) e da ponta corresponde ao volume total do tronco da árvore.

Os dados foram gravados em uma planilha eletrônica, contendo as seguintes informações: Identificação da árvore, espécie, número de toras, tamanho da ponteira, diâmetros e circunferências medidos na metade da seção da tora, e o volume real.

A construção de um banco de dados fez-se necessária para agrupar informações das variáveis dendrométricas mensuradas e de varredura *laser*. Este tipo de disposição permitiu organizar e localizar planilhas eletrônicas de forma rápida e eficiente, manipular e exportar dados via programação computacional e gerar relatórios do estudo.

3.7 PROCESSAMENTO

O processamento dos dados coletados trata da manipulação de arquivos contendo dados *laser* e de cálculos com as variáveis dendrométricas tabuladas em planilha eletrônica. Para facilitar a compreensão o item "processamento" foi dividido em dois tópicos: Nuvem de pontos e Cubagem Rigorosa. No primeiro é descrito o processamento de dados *laser* advindos da varredura múltipla; no segundo encontra-se a descrição do processamento das variáveis dendrométricas por cubagem rigorosa.

3.7.1 Nuvem de pontos

Os dados coletados pelo *laser scanner* encontram-se armazenados no disco rígido em arquitetura *Object Database Client/Server* do *Software Cyclone*, sendo que cada estação *laser* ocupa um diretório próprio (*Scan World*) que contém a nuvem de pontos da varredura.

A primeira tarefa realizada foi uma análise visual prévia da nuvem de pontos. Neste momento é verificada a consistência dos dados e se o número de varreduras foi suficiente para recobrir toda a superfície da árvore.

Após a análise prévia das varreduras foi iniciado o procedimento de preparação dos arquivos (registro, isolamento e referência) para o processamento via linguagem de programação.

3.7.1.1 Preparação dos arquivos

3.7.1.1.1 Registro

O registro é o procedimento que permite a união da nuvem de pontos em um sistema de coordenadas comum. Somente é possível realizar o registro quando existem pontos fixados como referência espacial em todas as varreduras simples, neste estudo, os pontos comuns são representados por "alvos".

Nos arquivos de varredura simples foram identificados os alvos para o registro e gerado um novo arquivo para consolidar a união de nuvens de pontos tomadas a partir das diferentes estações *laser* em campo.

Cada alvo teve o ponto central de sua superfície selecionado e definido como referência comum, este procedimento foi facilitado devido a maior densidade de pontos escolhida para a medição *laser* destes objetos.

A união dos dados foi então processada via *software Cyclone* utilizando a ferramenta de registro da nuvem de pontos. O processo de registro utiliza algoritmos matemáticos que calculam a transformação de alinhamento ótimo entre os alvos (pontos comuns) presentes nas varreduras simples de modo que a nuvem de pontos resultante esteja alinhada tão próxima quanto possível.

Em trabalhos de campo é recomendado pelo fabricante (Leica) que o resíduo admissível da união das nuvens de pontos seja menor que 0,010 metros (1cm). Este valor foi definido como parâmetro para aceitação do processo de registro, sendo que todas as árvores aqui trabalhadas apresentaram resíduo inferior a este valor adotado.

3.7.1.1.2 Isolamento

A nuvem de pontos resultante do procedimento de registro representa a árvore e todos os objetos que se encontravam presentes no campo de visada do *laser* no momento da medição.

Para que fosse possível trabalhar com dados que representassem apenas a superfície da árvore, objeto de estudo, foi preciso identificar e isolar estes indivíduos na nuvem de pontos. Este trabalho foi cumprido de forma semi-automatizada, utilizando ferramentas de edição (seleção e recorte).

A disposição das estações *laser*, que foram alocadas para obtenção de dados de indivíduos arbóreos isolados, e a numeração no tronco facilitaram o encontro da árvore de interesse na nuvem de pontos. A operação de isolamento é ilustrada na FIGURA 17.

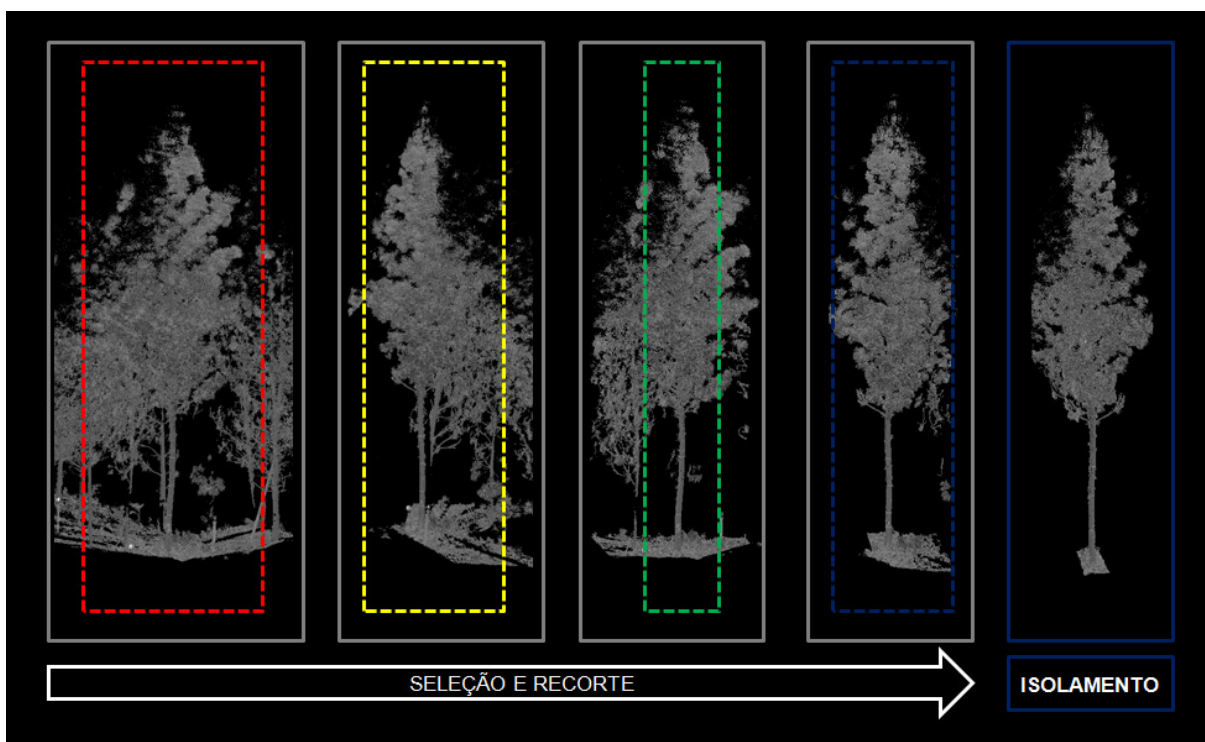


FIGURA 17 - ISOLAMENTO DA ÁRVORE NA NUVEM DE PONTOS.
FONTE: O Autor (2012)

Realizar a operação de isolamento é uma tarefa manual relativamente simples, porém trabalhosa. Neste estudo, para o isolamento total da árvore, foram necessárias quatro a seis seleções e recortes, o que tornou o procedimento moroso.

Com o objetivo de manter os dados originais esta tarefa sempre deve ser realizada em uma cópia do arquivo. A partir daqui esta cópia é considerada o arquivo padrão para os demais processamentos. Vale ressaltar que o novo arquivo criado contém somente as coordenadas tridimensionais pertencentes a uma árvore.

3.7.1.1.3 Sistema de coordenadas

A nuvem de pontos de dados *laser* provinda da varredura múltipla contém pontos de coordenadas tridimensionais referenciados por um sistema de coordenada local, relativo ao posicionamento do *laser* em campo.

Devido ao fato de que a altura da árvore é representada pela diferença linear entre o ponto de maior cota, definido pelo ápice da copa, e o ponto de menor cota, localizado na base da árvore junto ao chão, foi definido como origem do sistema de coordenadas local um ponto localizado na base da árvore (FIGURA 18).

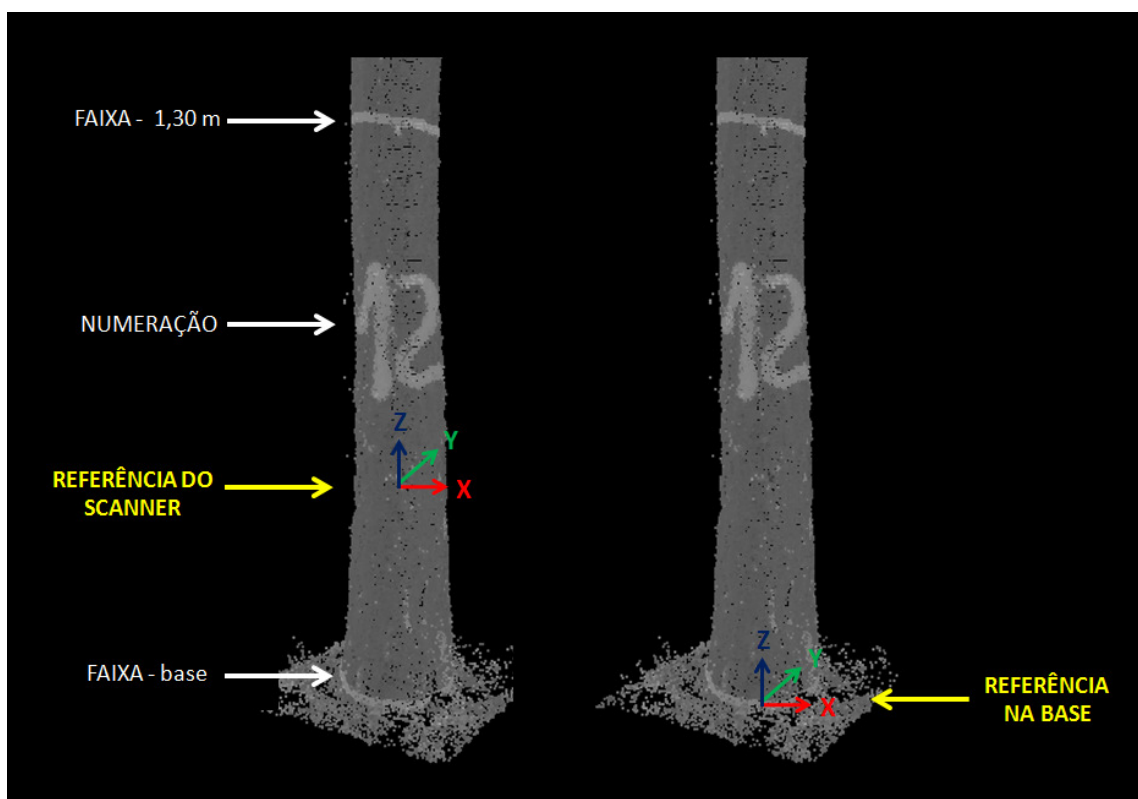


FIGURA 18 - NUVEM DE PONTOS E DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS
FONTE: O Autor (2012)

A ilustração permite verificar alguns detalhes importantes para a execução do trabalho: o número da árvore em evidência e a presença de faixas representadas pela tonalidade cinza claro na base e a 1,30 metros do solo. Ainda é possível visualizar o ponto zero do sistema de coordenadas (referência do *scanner*) antes

(esquerda) e após (direita) a mudança da origem do sistema de coordenadas (referência na base).

O sistema de referência foi facilmente manipulado via *software*, bastando a definição do ponto em que as coordenadas tridimensionais teriam valor zero. A faixa cinza claro se trata de uma fita adesiva colada junto ao tronco no momento da tomada de dados *laser*, o que facilitou a localização de ponto zero como referência espacial.

3.7.1.2 Métodos de filtragem

Após as atividades de isolamento, registro e referência, os dados padronizados foram exportados em formato texto (*.txt) para dar sequência aos processamentos de filtragem do tronco da árvore utilizando ferramentas computacionais já desenvolvidas e algoritmos implementados por meio de linguagem de programação.

3.7.1.2.1 Abordagem semi-automática

A abordagem semi-automática é definida pelo Filtro manual. Tem como princípio a remoção de dados que visualmente não correspondem ao tronco da árvore por meio da seleção de pontos no conjunto de dados *laser* da árvore.

O procedimento de filtragem foi realizado de forma análoga ao isolamento da árvore. Utilizando as ferramentas de edição da nuvem de pontos a remoção de galhos, folhas e sub-bosque para o separação do tronco da árvore foi realizada.

A necessidade da rotação dos eixos de coordenadas para selecionar os pontos que seriam removidos permitiu que os dados coletados fossem avaliados quanto aos problemas durante a coleta e ausência de pontos em partes da árvore.

O Filtro Manual (FMa) pode ser caracterizado pela interação entre ferramentas computacionais e o usuário da nuvem de pontos *laser*, o que o torna

passível de interferências humana, sendo imprescindível treinamento, cuidado e atenção durante sua aplicação.

3.7.1.2.2 Abordagem automática

Os métodos de filtragem automáticos, desenvolvidos neste estudo, tratam do isolamento do tronco da árvore por meio da programação de rotinas computacionais que realizam a filtragem automática e evitam influências subjetivas no processamento dos dados *laser*.

A idéia que repercutiu nos métodos de filtragem aqui apresentados em forma de rotinas computacionais versa sobre um pensamento simples e intuitivo: "*A melhor maneira para selecionar dados laser pertencentes ao tronco pode ser alcançada quando o observador estiver dentro da árvore*".

Para consolidar esta idéia e realizar a filtragem automática são necessários conceitos de álgebra, geometria analítica, trigonometria, estatística e programação computacional.

Inicialmente, foi efetuada a implementação de procedimentos básicos e comuns aos métodos de filtragem: Declaração dos parâmetros de entrada; Região de busca; Contagem de registros; Localização do ponto de cota máxima no eixo vertical "Z".

Os parâmetros de entrada são caracterizados no momento da coleta de dados: resolução do *laser*, tamanho e tortuosidade do tronco; e de acordo com o objetivo do processamento: espessura da fatia, tamanho do toco deixado em campo na derrubada da árvore, e das toras disponibilizadas para modelagem. Os valores utilizados para cada parâmetro podem ser observados no QUADRO 6.

PARÂMETROS DE ENTRADA (m)	
Resolução horizontal	0,005
Resolução vertical	0,010
Limite da região de busca	0,500
Espessura da fatia	0,050
Toco	0,100
Tora	1,000

QUADRO 6- PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O PROCESSAMENTO DE DADOS.
 FONTE: O Autor (2012)

Quanto aos parâmetros de resolução horizontal e verticais apresentados no QUADRO 6, observa-se a padronização da resolução vertical para 0,01 metros. Este valor foi escolhido para possibilitar a comparação da nuvem de pontos das árvores medidas com o *laser*. A resolução em campo foi maior ou igual a este valor utilizado.

O parâmetro de entrada "Limite da região de busca" pode ser entendido como a distância linear dos vértices de um quadrado em um sistema de coordenadas plano (X;Y), que tem como origem o ponto central de uma fatia do tronco da árvore.

O valor definido como limite da região de busca é utilizado para dar origem a um quadrado que delimitará uma área onde certamente serão encontrados pontos do tronco da árvore. Quando este valor é subtraído das coordenadas do centro da fatia define-se o vértice inferior esquerdo, quando acrescido define-se o vértice superior direito (FIGURA 19 a).

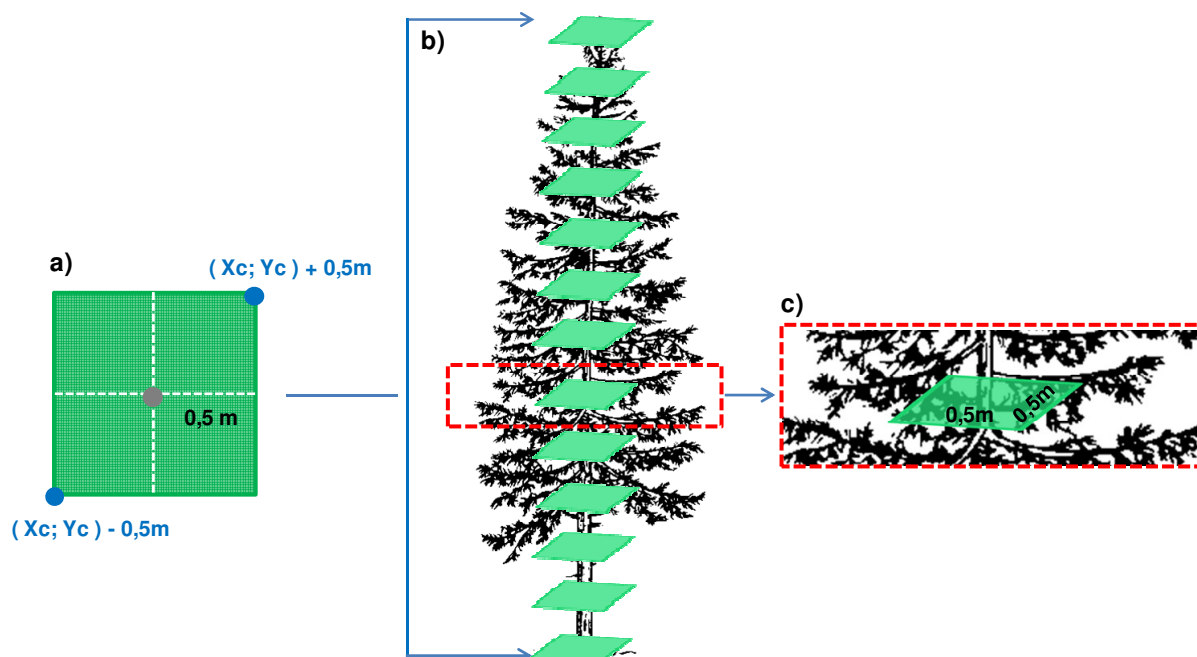


FIGURA 19 - REGIÃO DE BUSCA DE PONTOS *LASER* DO TRONCO: (a) DEFINIÇÃO DOS LIMITES DA REGIÃO DE BUSCA, (b) APLICAÇÃO DA REGIÃO DE BUSCA AO LONGO DO TRONCO, (c) DETALHE DE UMA SEÇÃO UTILIZANDO A REGIÃO DE BUSCA.
 FONTE: O Autor (2012)

O valor deste parâmetro é estabelecido de acordo com um limite definido pelo valor máximo do raio da maior seção transversal da árvore que será processada. Em geral a maior seção transversal encontra-se na base da árvore e conseqüentemente a região de busca é definida pelo raio desta seção.

A região de busca deve contemplar todos os pontos da superfície do tronco no que se refere as aplicações do processamento de dados em determinadas alturas da base ao ápice da árvore (FIGURA 19 b).

É preciso verificar a coerência da região de busca e analisar seu comportamento no processamento de dados para ter certeza de que a superfície do tronco esteja dentro de seus limites no momento do processamento (FIGURA 19 c).

No processamento computacional dos dados a estratégia de trabalho teve por base a divisão da nuvem de pontos em pequenos intervalos (fatias) referenciados no eixo "Z", respeitando a condição de que a quantidade de pontos fosse suficiente para formar a seção transversal da árvore em determinada altura (h_i). A este parâmetro fixou-se o nome de "espessura da fatia".

Os valores definidos para os parâmetros "toco" e "tora" correspondem, respectivamente, ao resíduo deixado em campo junto ao solo no momento do corte da árvore e do tamanho padrão adotado para o traçamento das toras.

A contagem de registros da nuvem de pontos foi utilizada em diversos momentos na programação, sendo caracterizado como um procedimento de simples implementação computacional e que tem grande utilidade ao processamento de dados *laser* realizado de forma iterativa.

É importante no processamento de dados obter a variável altura total da árvore, informação necessária para o cálculo do número de fatias (f) de acordo com intervalos definidos pela espessura. Neste estudo utilizou-se o valor do ponto de cota máxima no eixo "Z", como a altura total. Este procedimento foi aplicado por (LINGNAU *et al.*, 2009 e SILVA, 2011) e caracterizado como uma forma simples e eficiente de se obter a altura total.

O desenvolvimento de rotinas de filtragem automática foi marcado pela criação de algoritmos pertinentes a filtragem dos dados utilizando como base métodos encontradas na literatura, até então, para obtenção de variáveis dendrométricas.

Para facilitar a compreensão das rotinas propostas neste estudo os procedimentos básicos, que estão presentes em todas metodologias de filtragem, serão descritos a seguir:

a) Procedimento: Circunferência Ótima (C.O.)

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.*, 2006a, BIERNET *et al.*, 2007, LITKEY *et al.*, 2008., SILVA, 2011) buscando obter a variável dendrométrica diâmetro.

A 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) o centro ótimo é aquele em que a variância ou o desvio padrão das distâncias entre este centro e todos os pontos da fatia tem 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 todos os pontos da fatia e o ponto central estabelecido como referência do centro da circunferência a ser ajustada (centro de massa).

Para melhor compreensão do funcionamento do procedimento circunferência ótima foi elaborada a FIGURA 20.

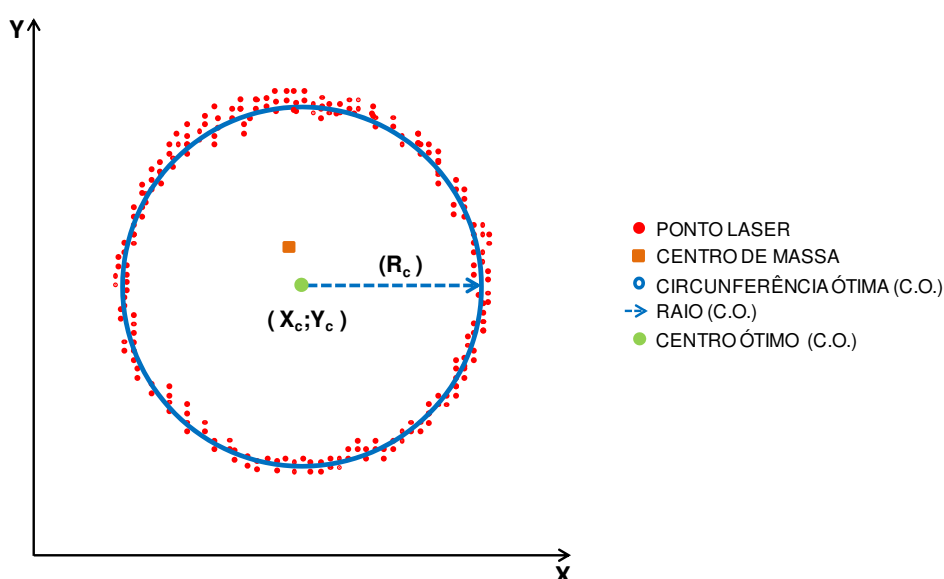


FIGURA 20 - PROCEDIMENTO CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA (C.O.)
 FONTE: O Autor (2012)

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) .

Este procedimento está presente em todas as rotinas de filtragem, sendo utilizado em várias instâncias do código de programação, sua implementação em forma de algoritmo é apresentada na FIGURA 21.

'Ajuste da circunferência ótima (C.O) X_c = coordenada aproximada do centro Y_c = coordenada aproximada do centro**Para** $p = 1$ até número de registros **faça:**

$$\text{Distância euclidiana} = \sqrt{(X_p - X_c)^2 + (Y_p - Y_c)^2}$$

Próximo p **Calcular:** Desvio padrão das distâncias euclidianas.**Aplicar:** *SOLVER*:

F.O. = Minimizar o desvio padrão da distância euclidiana
utilizando como células variáveis as coordenadas X_c e Y_c

Resultado: Circunferência ajustada à nuvem de pontos:Centro ótimo = $X_c ; Y_c$ Média das distâncias euclidianas = R_c

FIGURA 21 - ALGORITMO DO PROCEDIMENTO CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA (C.O.)
FONTE: O Autor (2012)

A aplicação deste procedimento foi essencial para a obtenção dos valores do raio e das coordenadas XY do centro da circunferência ajustada à nuvem de pontos. Estes valores constituem a referência para a criação de pontos de busca do procedimento descrito a seguir.

b) Procedimento: Seleção de Pontos (S.P.)

Este método foi desenvolvido e aplicado por autores que buscaram encontrar a área transversal da árvore por meio da seleção de pontos próximos ao perímetro de uma circunferência ajustada e cálculo da área transversal (PEREIRA E PEREIRA, 2009; KIRÁLY e BROLLY, 2010; SIILVA, 2011).

O procedimento utilizado para criar pontos de busca de dados *laser* pertencentes ao tronco está baseado em princípios de trigonometria, onde os valores do centro e raio obtido no método da circunferência ótima são aplicados nas funções trigonométricas que descrevem uma circunferência:

$$X_i = X_c + R_c * \text{sen}(\alpha) \quad (4)$$

$$Y_i = Y_c + R_c * \text{cos}(\alpha) \quad (5)$$

Onde:

X_i = coordenada X do ponto i

Y_i = coordenada Y do ponto i

X_c = coordenada X do ponto central

Y_c = coordenada Y do ponto central

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. O funcionamento do procedimento seleção de pontos é lustrado na FIGURA 20.

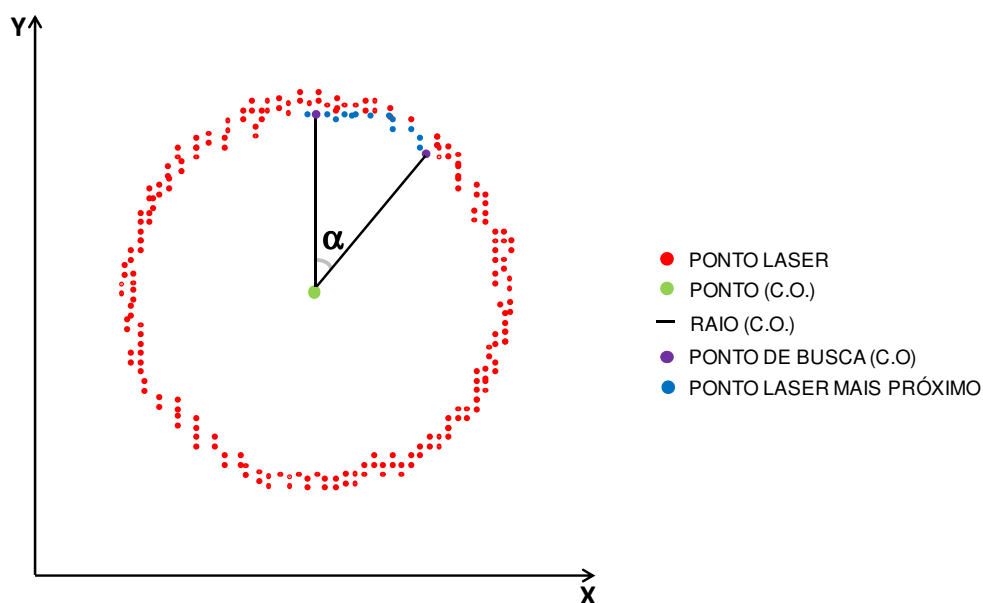


FIGURA 22 - PROCEDIMENTO SELEÇÃO DE PONTOS (S.P.)
 FONTE: O Autor (2012)

O algoritmo foi implementado via linguagem de programação com o intuito de disponibilizar pontos de busca e localizar dados *laser* pertencentes ao tronco, utilizando como critério a proximidade entre pontos (FIGURA 23).

Para $j = 1$ até nPt **faça:**

Calcular: coordenadas X_j e Y_j do ponto de busca:

$$\alpha = j * gPt$$

$$X_j = X_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{sen}(\alpha)$$

$$Y_j = Y_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{cos}(\alpha)$$

Selecionar: ponto *laser* mais próximo

$$D_{\min} = 100$$

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

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

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

FIGURA 23 - ALGORITMO DO PROCEDIMENTO SELEÇÃO DE PONTOS (S.P.)
FONTE: O Autor (2012)

De acordo com a demonstração do algoritmo seleção de pontos, é necessário a definição do número de pontos teóricos (nPt) que representem o perímetro da circunferência e o intervalo angular (gPt) entre pontos para dar origem aos pontos de busca. Estes parâmetros podem ser pré-fixados ou definidos de acordo com a circunferência ajustada e o intervalo estabelecido para espessura.

Para que a busca pelo ponto *laser* seja iniciada é adotada uma distância inicial (D_{\min}) que será confrontada com o valor obtido para distância euclidiana entre o ponto de busca e o ponto *laser*, toda vez que encontrado uma distância menor do que D_{\min} , seu valor será substituído. Por fim o algoritmo encontra o ponto *laser* mais próximo e grava as respectivas coordenadas do ponto selecionado para a memória do computador.

c) Procedimento Padrão

As rotinas, que serão aqui descritas, iniciam sempre com a declaração dos parâmetros de entrada e com uma particularidade para o processamento da primeira fatia: ausência do ponto central da fatia para aplicação do procedimento circunferência ótima.

A utilização da ferramenta *SOLVER* no procedimento Circunferência Ótima (C.O.) está condicionada à existência de um par de coordenadas ($X_c; Y_c$) aproximado ao do centro da circunferência que será ajustada.

Para atender esta condição duas situações foram definidas:

I. Primeira fatia de dados para o processamento (fatia = 0)

As coordenadas aproximadas do centro da circunferência ($X_c; Y_c$) devem adotar como valor inicial a média aritmética dos pontos nos respectivos eixos X e Y.

II. Demais fatias de dados para o processamento (fatia > 0)

As coordenadas aproximadas do centro da circunferência ($X_c; Y_c$) devem assumir os valores do centro da circunferência da fatia anterior ($X_{c(f-1)}; Y_{c(f-1)}$).

O procedimento padrão refere-se à solução para o ajuste e seleção do conjunto de pontos enquadrado na primeira situação (fatia=0). Ele será implementado nas rotinas de filtragem que descrevem a solução encontrada para a segunda situação (fatia > 0).

Este procedimento inicia com o cálculo do centro de massa. De posse desta informação é aplicado o procedimento da circunferência ótima pela primeira vez, em que os resultados obtidos no ajuste são: par de coordenadas do centro (X_c e Y_c) e o raio (R_c) da circunferência ajustada.

Problemas no procedimento de ajuste da circunferência ótima podem ocorrer devido à presença de pontos do terreno e sub-bosque acarretando em valores tendenciosos para a média das coordenadas X e Y, podendo resultar em uma circunferência ajustada a pontos que não fazem parte do tronco.

Sendo assim, para a primeira fatia, foi utilizada a metade do raio da circunferência ajustada. Isto visa garantir que os pontos de busca não estejam fora

do perímetro do tronco da árvore. O centro de massa, a circunferência ajustada e a gerada pela utilização da metade do raio podem ser visualizados, respectivamente, na FIGURA 24 a.

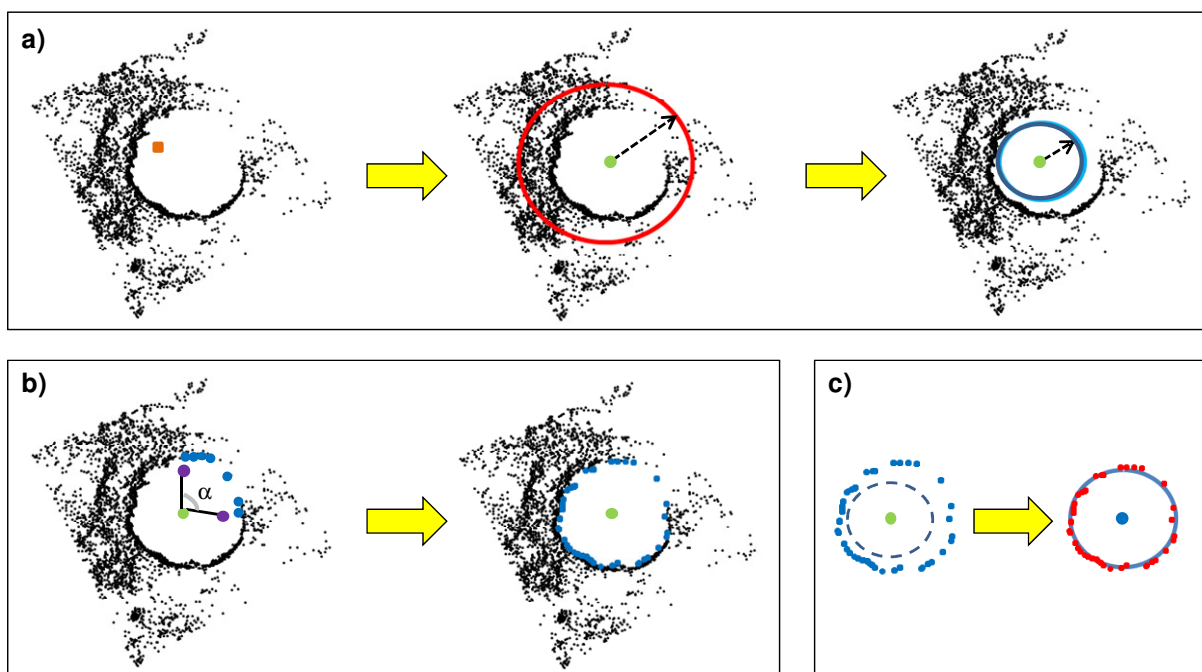


FIGURA 24 - PROCEDIMENTO PADRÃO (fatia=0): (a) PRIMEIRA APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA, (b) APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO SELEÇÃO DE PONTOS, (c) SEGUNDA APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA
 FONTE: O Autor (2012)

Com estes valores a rotina é direcionada ao procedimento Seleção de Pontos (S.P). Neste momento são utilizadas as funções trigonométricas que descrevem uma circunferência para eleger os pontos de busca a cada 1º (um grau), totalizando 360 pontos de busca para primeira fatia.

O ponto de busca criado pelo procedimento S.P. é submetido a uma condição de proximidade entre pontos, visando garantir que o ponto selecionado na nuvem corresponda ao ponto mais próximo linearmente dentre seus vizinhos.

Assim que encontrado, o dado *laser* selecionado é gravado na memória e a rotina continua com o próximo ponto de busca até que sejam encontrados os 360 pontos *laser* (FIGURA 24 b).

Os pontos selecionados são submetidos à segunda aplicação do procedimento circunferência ótima visando encontrar o centro ótimo e o raio da

circunferência ajustada a este novo conjunto de dados para servir de referência (X_c e Y_c) à primeira fatia maior que zero (FIGURA 24 c).

O algoritmo do procedimento padrão é ilustrado na FIGURA 25 e demonstra a aplicação para fatia igual a zero:

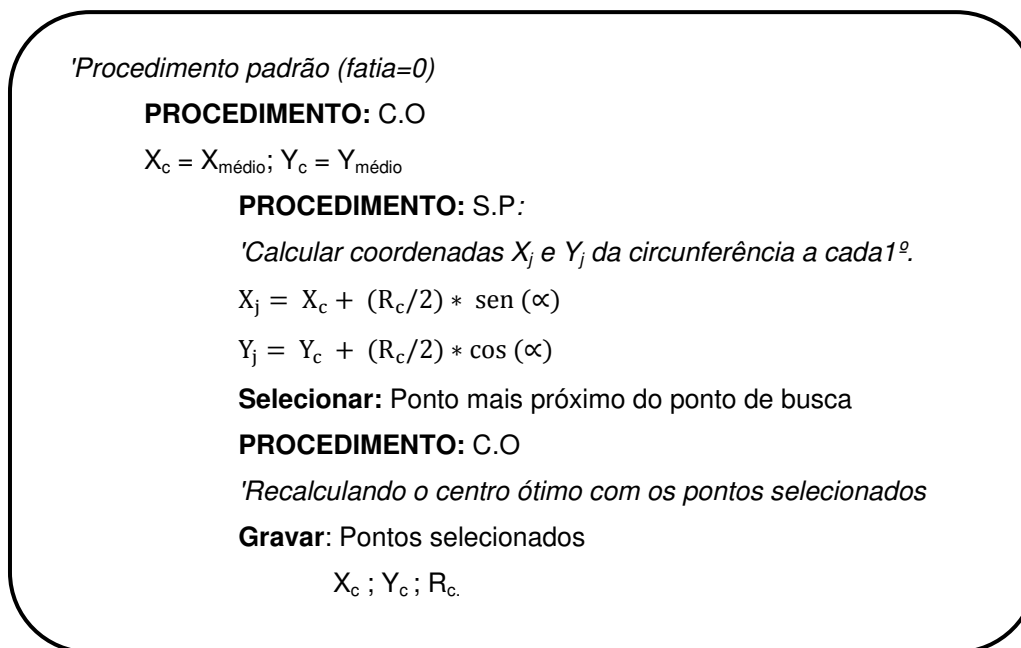


FIGURA 25 - ROTINA DE FILTRAGEM 1 PARA $f=0$
 FONTE: O Autor (2012)

De acordo com a FIGURA 25 é importante destacar novamente que para a finalização do processamento da fatia $f=0$ o procedimento de ajuste da circunferência ótima é novamente acionado. Este passo é importante e visa prover os dados necessários ao processamento da fatia seguinte.

Terminado o processamento de $f=0$ a rotina passa a trabalhar com fatias que irão utilizar os dados de centro e raio da circunferência ajustada no processamento anterior ($X_{c(f-1)}; Y_{c(f-1)}; R_{c(f-1)}$) como referência para iniciar o processamento fatia subsequente, metodologia semelhante a proposta por BIENERT *et al.*, (2006b).

3.7.1.2.2.1 Filtro Seções Transversais (FSt)

O Filtro Seções Transversais foi o precursor dos métodos de filtragem estabelecidos neste trabalho. As demais rotinas que serão apresentadas trazem em sua implementação computacional o código base do FSt .

A rotina de filtragem FSt vai iniciar com a aplicação do Procedimento Padrão nos dados da fatia=0. Para fatias maiores que zero a rotina aciona o Procedimento seleção de pontos, utilizando como valor de referência o raio da fatia ajustada anteriormente ($R_{c(f-1)}$) para dar origem aos pontos de busca.

Os dados selecionados no procedimento Seleção de Pontos (S.P.) são gravados na memória e o procedimento Circunferência Ótima (C.O.) é acionado para o conjunto de pontos selecionados. Utilizando estatística, no que tange a medidas de dispersão, é calculado o desvio padrão das distâncias euclidianas dos pontos selecionados em relação ao centro da circunferência ajustada.

Conforme proposto por Litkey *et al.*, (2008), é estabelecido que pontos que estiverem a uma distância superior a do raio acrescido de dois desvios padrão das distâncias euclidianas serão excluídos. Para este procedimento foi adotado o nome de " Procedimento Exclusão de Pontos" e encontra-se inserido na rotina FSt (FIGURA 26).

PROCEDIMENTO: PADRÃO (*fatia=0*)*'Procedimento com a fatia > 0*

$$X_c = X_{c(f-1)} ; Y_c = Y_{c(f-1)} ; R_c = R_{c(f-1)}$$

Acionar: REGIÃO DE BUSCA**PROCEDIMENTO: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS:***'Calcular coordenadas X_j e Y_j da circunferência a cada 1°*

$$X_j = X_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{sen}(\alpha)$$

$$Y_j = Y_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{cos}(\alpha)$$

Selecionar: Ponto mais próximo do ponto de busca**PROCEDIMENTO: C.O***'Recalculando o centro ótimo com os pontos selecionados***PROCEDIMENTO: EXCLUSÃO DE PONTOS***'Excluindo pontos com distância superior ao raio + 2 desvios**d = desvio padrão da distância euclidiana***Para** r = 1 até o último registro**Se** Distância euclidiana < $R_c + 2d$ **faça:**Gravação das coordenadas X_s e Y_s **Próximo r****PROCEDIMENTO: C.O***'Recalculando o centro ótimo com os pontos selecionados***Gravar:** Conjunto de pontos selecionados para fatia > 0:Coordenadas X_s ; Y_s ; Z_f .*'Próxima fatia*

FIGURA 26 - ROTINA FILTRO SEÇÕES TRANSVERSAIS (FSt)
 FONTE: O Autor (2012)

Após a exclusão dos pontos novamente é chamado o procedimento C.O. para encontrar os valores que serão utilizados no processamento da próxima fatia. Os pontos selecionados são gravados na planilha eletrônica para cada fatia processada. Cabe destacar que as coordenadas são selecionadas no plano XY, e que o valor da coordenada Z é obtido de acordo com a altura em que se encontra a fatia (X_s ; Y_s ; Z_f).

3.7.1.2.2 Filtro Seções Transversais Modificado (FMo)

O Filtro Seções Transversais Modificado utiliza os princípios do Filtro Seções Transversais. A principal diferença entre as metodologias propostas reside na quantidade de pontos de busca para fatias maiores que zero. Estes pontos de busca são definidos de acordo com um número de pontos que teoricamente deveriam ser encontrados para uma determinada fatia da árvore.

Partindo da hipótese de que uma fatia tem aproximadamente 0,05 metros de espessura, onde foi aplicado uma resolução vertical de 0,01 metros e padronizada a resolução horizontal em 0,005 metros é possível chegar ao número de pontos teóricos que representariam a superfície de um cilindro aplicando as seguintes fórmulas, respectivamente:

$$Ct = 2. \pi. R_c \quad (6)$$

$$nPt = \left(\frac{Esp}{RV} \cdot \frac{Ct}{RH} \right) \quad (7)$$

$$gPt = \frac{360^\circ}{nPt} \quad (8)$$

Onde:

Ct = circunferência teórica (m)

R_c = raio da circunferência ajustada (m)

nPt = número de pontos

Esp = espessura da fatia (m)

RV = resolução vertical (m)

RH = resolução horizontal (m)

gPt = distância em graus dos pontos teóricos

Aplicando as fórmulas descritas acima é possível obter o número de pontos que teoricamente deveriam representar a superfície do tronco. A programação da rotina pode ser observada na FIGURA 27.

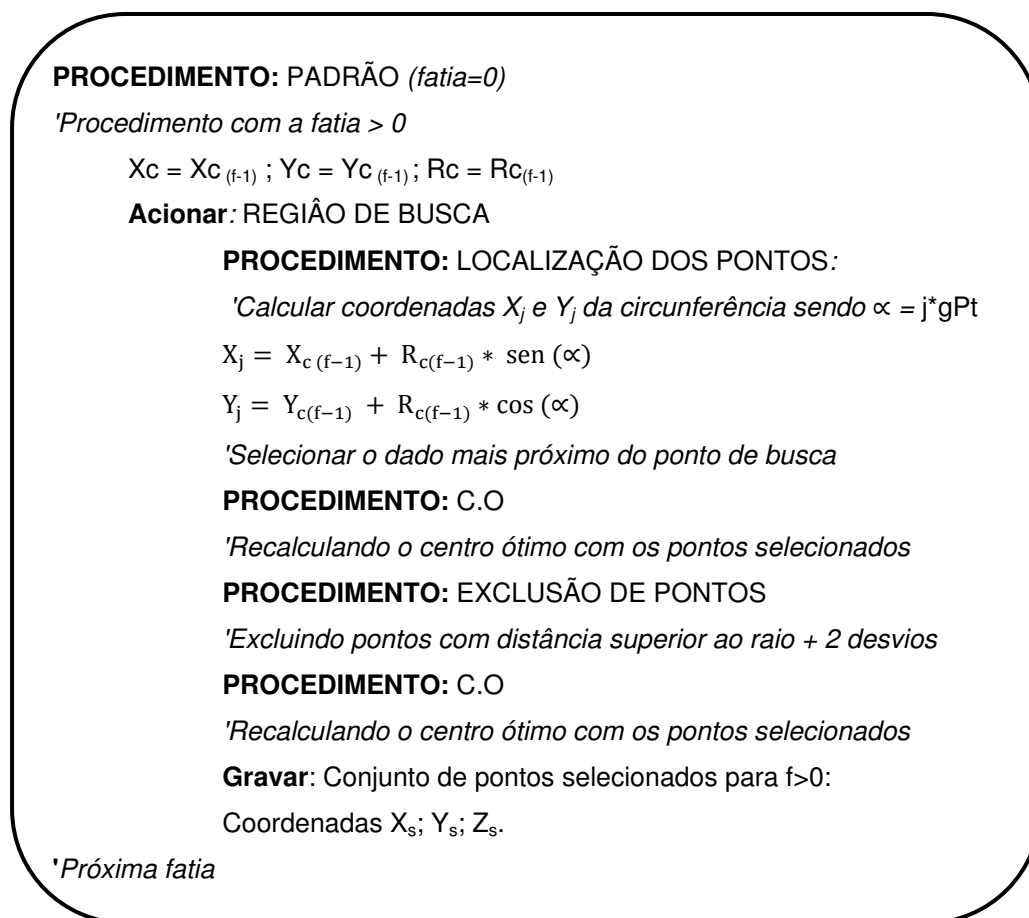


FIGURA 27 - ROTINA FILTRO SEÇÕES TRANSVERSAIS MODIFICADO (FMo)
 FONTE: O Autor (2012)

A finalização da rotina de filtragem é muito semelhante aos procedimentos aplicados no FSt, porém, além das coordenadas planas XY dos pontos selecionados também é armazenado o valor da coordenada Z para cada ponto ($X_s; Y_s; Z_s$).

3.7.1.2.2.3 Filtro Distância Máxima (FDm)

O método de filtragem Distância máxima foi desenvolvido com o intuito de melhorar os resultados da filtragem, eliminando pontos que ficavam dispersos quando aplicado as rotinas FSt e FMo.

Para isso foi idealizado uma rotina de filtragem que utiliza os procedimentos básicos até aqui citados e executa um novo procedimento elaborado com base nos conceitos *Mean Shift Clustering*.

A metodologia *Mean Shift* proposta originalmente por Fukunaga & Hostetler, (1975) utiliza uma função de densidade e probabilidade para encontrar os máximos de um conjunto de dados amostrados delimitados por um *kernel*.

Para o entendimento da metodologia imagine um algoritmo que parte de um ponto (X_i^0) e estabelece uma determinada região (*kernel*) em torno dele para o cálculo do centro de massa definido como sendo a média aritmética das coordenadas X e Y dos pontos que estão dentro do *kernel* (FIGURA 28).

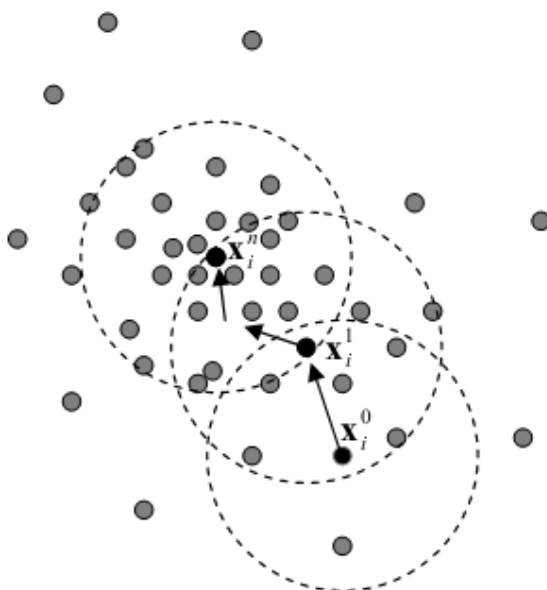


FIGURA 28 - FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO *Mean shift*
FONTE: Adaptado de DERPANIS (2005)

Encontrado o centro de massa (X_i^1), o algoritmo continua sendo executado e agora realiza o cálculo do novo centro de massa a partir dos dados compreendidos dentro da região do novo *kernel*. As iterações ocorrem até que o centro de massa calculado (X_i^n), estabilize e a região de busca não seja alterada.

O algoritmo proposto para a rotina de filtragem trata da utilização dos procedimentos "Exclusão de Pontos" e "C.O." em conjunto e de forma iterativa. Este recebeu o nome de "Procedimento Estabiliza Desvio Padrão" (FIGURA 29).

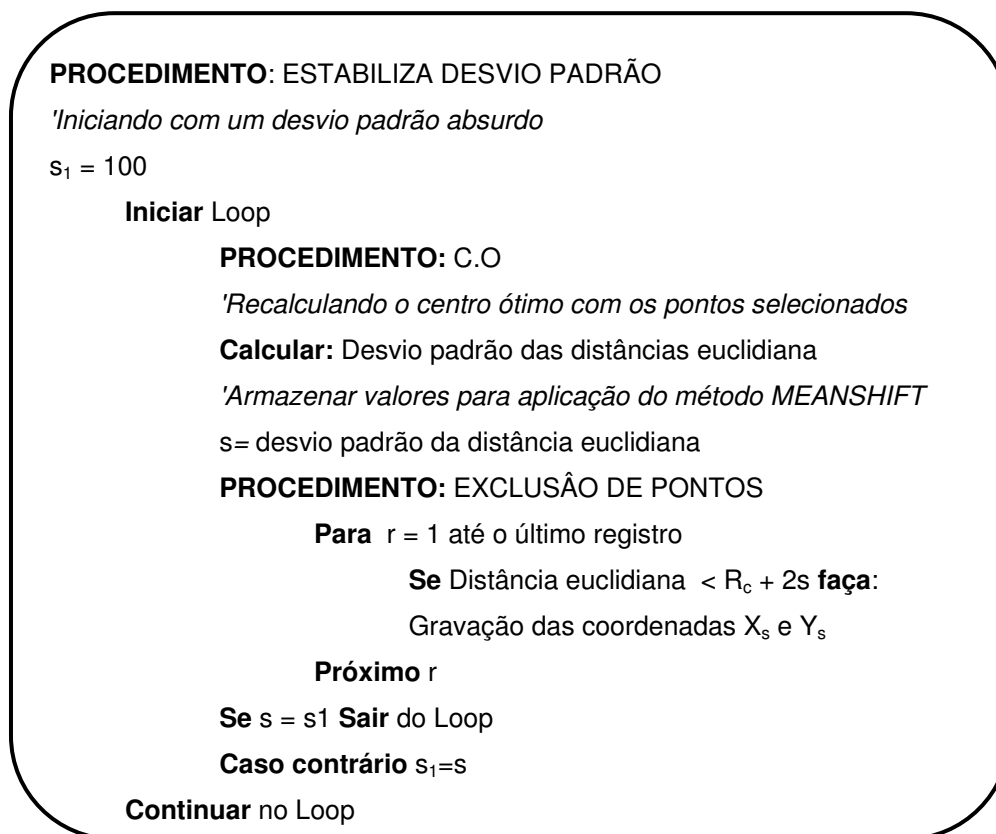


FIGURA 29 - PROCEDIMENTO ESTABILIZA DESVIO PADRÃO
 FONTE: O Autor (2012)

O procedimento Estabiliza Desvio Padrão seleciona pontos a uma distância máxima do raio mais dois desvios padrão das distancias euclidianas em relação ao centro da fatia. Ele é realizado dentro de um *loop*⁴ onde os procedimentos Circunferência Ótima (C.O) e Exclusão de Pontos são acionados em sequência até que o desvio padrão calculado permaneça inalterado (estabiliza desvio padrão). A saída do *loop* é realizada quando não ocorrer exclusão de pontos na fatia. A rotina completa pode ser visualizada na FIGURA 30.

⁴ *Loop*: Processo que se repete várias vezes até que se alcance a condição previamente estabelecida.

PROCEDIMENTO: PADRÃO (*fatia=0*)

'Procedimento com a fatia > 0

$$X_c = X_{c(f-1)}; Y_c = Y_{c(f-1)}; R_c = R_{c(f-1)}$$

Acionar: REGIÃO DE BUSCA

PROCEDIMENTO: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS:

*'Calcular coordenadas X_j e Y_j da circunferência sendo $\alpha = j * gPt$*

$$X_j = X_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{sen}(\alpha)$$

$$Y_j = Y_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{cos}(\alpha)$$

'Selecionar o dado mais próximo do ponto de busca

PROCEDIMENTO: ESTABILIZA DESVIO PADRÃO

'Iniciando com um desvio padrão absurdo

$$s_1 = 100$$

Iniciar Loop

PROCEDIMENTO: C.O

'Recalculando o centro ótimo com os pontos selecionados

Calcular: Desvio padrão das distâncias euclidianas

'Armazenar valores para aplicação do método MEANSHIFT

$s =$ desvio padrão da distância euclidiana

Para $r = 1$ até o último registro

Se Distância euclidiana $< R_c + 2s$ **faça:**

Gravação das coordenadas X_s e Y_s

Próximo r

Se $s = s_1$ **Sair** do Loop

Caso contrário $s_1 = s$

Continuar Loop

'Próxima fatia

FIGURA 30 - ROTINA FILTRO DISTÂNCIA MÁXIMA (FDm)
 FONTE: O Autor (2012)

3.7.1.2.2.4 Filtro Pontos Indexados (FPi)

O Filtro Pontos Indexados (FPi) diferencia-se dos demais métodos abordados por apresentar um procedimento que não permite que os pontos sejam repetidos durante a seleção, qual foi denominado como: Indexar Ponto Selecionado.

O procedimento de indexação dos pontos é unicamente a marcação do ponto já escolhido como mais próximo do ponto de busca, sendo que este, uma vez selecionado, não deverá estar disponível para seleção dos dados.

Esta é uma forma relativamente simples de não permitir que durante a aplicação do procedimento de seleção de dados *laser* não ocorra a repetição na escolha do ponto. Isto ocorre devido a proximidade dos pontos de busca, que podem encontrar um ponto já selecionado como o mais próximo. A rotina para a aplicação do Filtro Pontos Indexados pode ser visualizada na FIGURA 31.

PROCEDIMENTO: PADRÃO (*fatia=0*)

'Procedimento com a fatia > 0

$$X_c = X_{c(f-1)} ; Y_c = Y_{c(f-1)} ; R_c = R_{c(f-1)}$$

Acionar: REGIÃO DE BUSCA

'PROCEDIMENTO: SELEÇÃO DE PONTOS:

*'Calcular coordenadas X_j e Y_j da circunferência sendo $\alpha = j * gPt$*

$$X_j = X_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{sen}(\alpha)$$

$$Y_j = Y_{c(f-1)} + R_{c(f-1)} * \text{cos}(\alpha)$$

'Selecionar o dado mais próximo do ponto de busca que não estiver indexado

PROCEDIMENTO: INDEXAR PONTO SELECIONADO

PROCEDIMENTO: ESTABILIZA DESVIO PADRÃO

'Iniciando com um desvio padrão absurdo

$$s_1 = 100$$

Iniciar Loop

PROCEDIMENTO: C.O

'Recalculando o centro ótimo com os pontos selecionados

Calcular: Desvio padrão das distâncias euclidiana

'Armazenar valores para aplicação do método MEANSHIFT

$s =$ desvio padrão da distância euclidiana

Para $r = 1$ até o último registro

Se Distância euclidiana $< R_c + 2s$ **faça:**

Gravação das coordenadas X_s e Y_s

Próximo r

Se $s = s_1$ **Sair** do Loop

Caso contrário $s_1 = s$

Continuar Loop

'Próxima fatia

FIGURA 31 - ROTINA FILTRO PONTOS INDEXADOS (FPi)
 FONTE: O Autor (2012)

3.7.1.3 Modelagem 3D

Os dados *laser* submetidos aos métodos de filtragem deram origem a novas nuvens de pontos para cada árvore do conjunto de dados. Para produzir modelos tridimensionais do tronco que pudessem ser comparados aos dados de cubagem em campo, foi optado pela aplicação da modelagem em seções (toras) de um metro a partir da altura de corte da árvore.

Desta forma, a nuvem de pontos precisa ser processada para a separação das toras que serão submetidas à modelagem tridimensional. Foi então proposta a aplicação de um procedimento capaz de efetuar a divisão da nuvem de pontos do tronco em toras utilizando apenas os valores de coordenadas do eixo X e Z.

Este procedimento foi denominado "Separação em Toras". A forma idealizada para separar a nuvem de pontos foi implementada via programação computacional e o algoritmo pode ser visualizado na FIGURA 32.

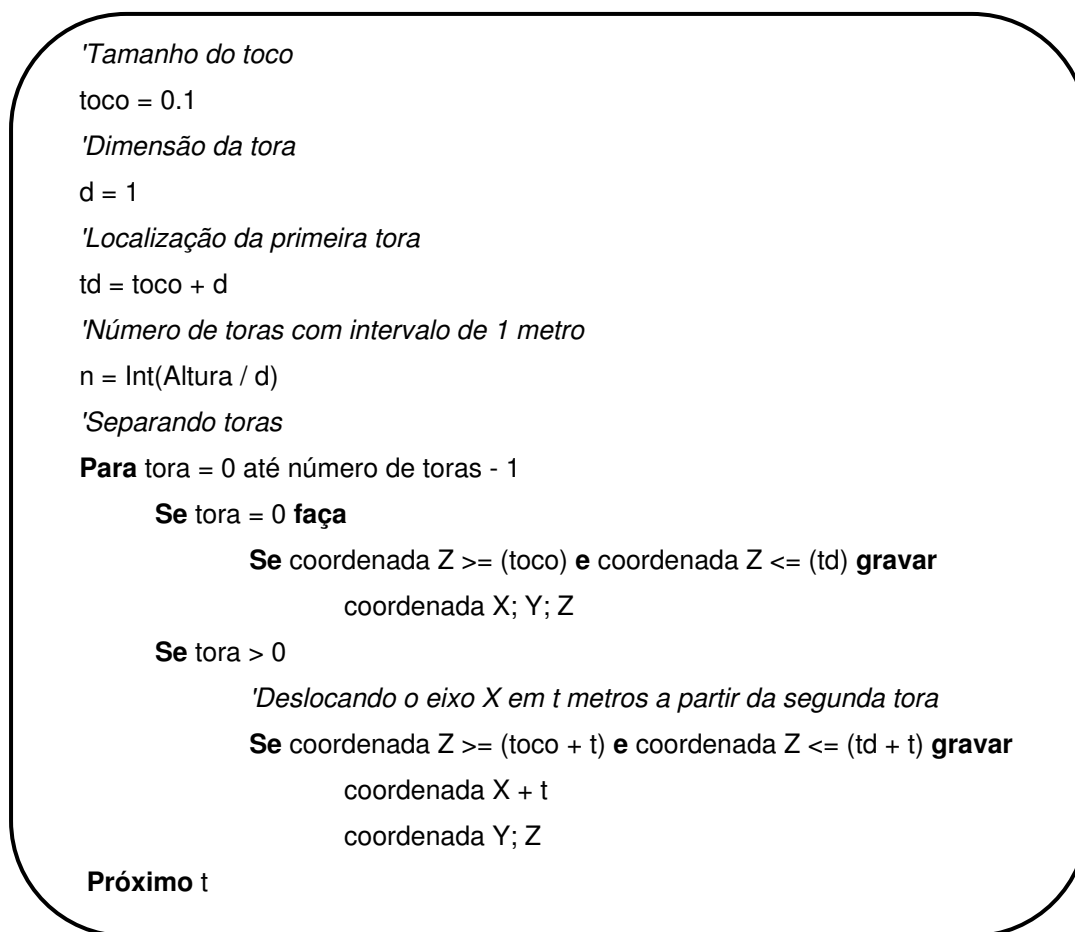


FIGURA 32 - PROCEDIMENTO SEPARAÇÃO EM TORAS
 FONTE: O Autor (2012)

O Procedimento Separação em Toras necessita de dois parâmetros iniciais que devem definidos de acordo com o resíduo em campo (toco) e o tamanho das seções desejadas para a divisão do tronco. A altura do tronco é determinada pelo ponto de maior cota no eixo de coordenada Z. A primeira tora é encontrada pelo algoritmo de acordo com os limites estabelecidos nos parâmetros de entrada e tem seus dados originais preservados. Para as demais toras a estratégia de separação do tronco é acrescentar unidades métricas à coordenada X dos pontos de acordo com a sua posição no tronco.

O modelo tridimensional do tronco da árvore será produzido utilizando a metodologia proposta por Aschoff *et al.* (2004), que descreve o emprego de redes de triangulação irregular para alcançar um modelo preciso de um tronco de uma árvore, utilizando no processo apenas pontos que representem a superfície do objeto de interesse.

Desta forma, para que o modelo 3D do fuste seja confiável, a nuvem de pontos advinda do processo de filtragem deve representar apenas a superfície do tronco da árvore que se deseja modelar.

A modelagem tridimensional, utilizando o processo de rede triangular irregular (FIGURA 33), será realizada através de rotinas implementadas em *software* de modelagem de dados *laser*.

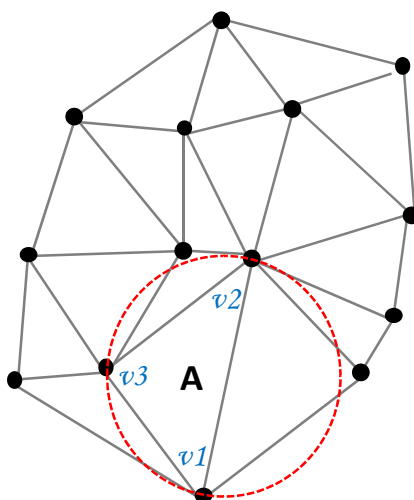


FIGURA 33 - REDE TRIANGULAR IRREGULAR
FONTE: Adaptado de ET SPATIAL TECHNIQUES (2011)

O processo para geração de uma rede triangular irregular (triangulação Delaunay) está baseado na proximidade entre pontos, satisfazendo o pressuposto de que um círculo desenhado através dos três vértices de um triângulo não contém outro vértice em seu interior. Detalhes sobre a aplicação de malhas envolvendo modelagem de objetos podem ser encontrados em EDELSBRUNNER (2001).

Para realização da modelagem foi utilizado o *Software 3DReshaper*® versão demonstrativa. Este *software* permite modelar tridimensionalmente a árvore e obter o volume dos sólidos do tronco da árvore.

3.7.2 Cubagem Rigorosa

A cubagem rigorosa é um procedimento analítico que tem sido empregado para proporcionar volumes ditos "reais" por meio da utilização de fórmulas matemáticas que utilizam variáveis dendrométricas supostamente obtidas com "rigor" por instrumentos de mensuração no campo.

Em estudos confrontando métodos de cubagem absolutos com o valor paramétrico do volume do tronco foi demonstrado que a cubagem por *Huber* apresenta-se como melhor fórmula para se obter o volume acurado (MACHADO E NADOLNY, 1991; FIGUEIREDO FILHO *et al.*, 2000).

Os cálculos de cubagem rigorosa com os dados coletados em campo na mensuração florestal (suta e fita métrica), foram efetuados empregando a fórmula de *Huber*, a qual necessita apenas do comprimento e da medida da secção transversal do meio da tora, conforme demonstrado na equação 9.

$$v_t = g_m * l \quad (9)$$

Onde: l é o comprimento da tora (m);

g_m é a área transversal da secção do meio da tora (m²);

v_t é o volume da tora (m³).

O somatório dos volumes dos toretes adicionando o volume da ponta disponibilizam o valor do volume total do tronco, representado pela seguinte expressão:

$$v = v_{t1} + v_{t2} + v_{t3} + \dots + v_{tn} + v_p \quad (10)$$

Onde: v é o volume total do tronco (m^3);

v_{tn} é o volume de cada tora n (m^3);

v_p é o volume da ponta do tronco (m^3).

Considerando o volume inteiro do tronco o volume da ponta é definida como um tronco de cone, conforme consta na equação 11.

$$v_p = \frac{g_n * l_p}{3} \quad (11)$$

Onde: v_p é o volume da ponta do tronco (m^3).

g_n é a área transversal da secção do início da ponta (m^2);

l_p é o comprimento da ponta (m).

Os dados de volume total e parcial obtidos, foram tabulados em planilha eletrônica para posterior análise e comparação com valores obtidos na modelagem tridimensional e pelo método de deslocamento de água.

3.8 ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE DADOS

A análise do processamento de dados é distinguida pela avaliação dos métodos de filtragem aplicados neste trabalho por meio de uma abordagem qualitativa.

3.8.1 Análise qualitativa

A visão pode ser considerada a forma primordial para análise dos dados filtrados, por meio dela, é factível examinar detalhadamente a nuvem de pontos resultante do processo de filtragem.

O olho humano tem a capacidade para prover informações sobre a nuvem de pontos que nenhum algoritmo otimizado para análise da filtragem poderia alcançar. Em contrapartida, a análise deve ser criteriosa e desprovida de uma avaliação com caráter subjetivo.

Duas formas de análise qualitativa para verificar a eficácia dos métodos de filtragem foram abordadas neste trabalho:

A primeira forma diz respeito à avaliação da nuvem de pontos obtida pelos diferentes métodos de filtragem quanto à disposição geral dos dados permitindo apontar o comportamento de cada método de filtragem para o isolamento do tronco.

A segunda forma foi realizada dividindo o tronco da árvore em 4 partes, correspondentes a base da árvore, 50% e 75% da altura total, e a ponta. O limite entre cada porção ficou estabelecido em 25%.

Nestas porções foram avaliadas duas características: a presença de pontos dispersos (D) na nuvem de pontos que representa o tronco e a ausência de dados para formar a superfície do tronco da árvore, definido como partes incompletas (I).

Quadros para a análise dos dados foram confeccionados e cada árvore foi periciada nos intervalos supracitados. Quando avaliado e observado a ocorrência de pontos dispersos ou de partes incompletas, foi atribuído o valor unitário para determinada porção da árvore, sendo que o somatório dos valores atribuídos resultariam na qualificação dos problemas do método de filtragem.

Por fim, os métodos de filtragem foram arranjados em um *Ranking*⁵, correspondente a classificação das metodologias de filtragem que atingiram a menor pontuação referente aos problemas avaliados.

⁵ *Ranking*: Classificação de acordo com o somatório da pontuação unitária recebida.

3.8.2 Análise quantitativa

3.8.2.1 A nuvem de pontos do tronco

A nuvem de pontos gerada pelo processamento computacional dos filtros, quando comparada aos dados *laser* originais da árvore, pode apresentar resultados importantes para a compreensão do funcionamento das metodologias de filtragem desenvolvidas.

Para tal, algumas das seguintes características foram avaliadas: número total de pontos da nuvem original; relação entre os pontos selecionados na filtragem e o total de dados da árvore; repetição de dados selecionados pela proximidade com pontos de busca; número efetivo de pontos filtrados pertencentes ao tronco; e o percentual de filtragem em relação a altura total da árvore.

As características avaliadas foram apresentadas em forma de tabelas e gráficos, o que facilitou a constatação de tendências e a avaliação da eficiência de cada procedimento de filtragem.

3.8.2.2 A modelagem do tronco

Com intuito de examinar a qualidade dos dados da filtragem aplicados à modelagem do tronco, foi realizada ainda uma análise visual das toras para verificar a disposição dos pontos da superfície do tronco. Isto contribuiu para o entendimento dos resultados obtidos para o volume de modelagem tridimensional.

A variável volume foi adotada neste trabalho como parâmetro quantitativo para confrontar os resultados obtidos pela aplicação das diferentes metodologias de filtragem desenvolvidas, possibilitando atestar e recomendar determinada rotina aqui implementada quando se almeja o volume do tronco pelo processamento de dados *laser*.

As toras divididas em um metro de comprimento foram avaliadas quanto ao número de toras modeladas em relação à quantidade de toras xilômetradas e quanto ao volume obtido do modelo tridimensional.

Os dados referentes à nuvem de pontos filtrada e a modelagem da nuvem de pontos foram demonstrados em forma de figuras e os resultados de volume confrontados com métodos de cubagem rigorosa e o valor paramétrico apresentados em tabelas com o desvio relativo ao volume do Xilômetro.

3.8.3 Inferência estatística

Segundo Koehler (1996), o problema da inferência estatística é o de determinar se alguma significância estatística pode ser acoplada aos resultados de uma pesquisa.

Os valores obtidos para a modelagem do tronco foram analisados até aqui quanto à dispersão dos resíduos relativos ao valor paramétrico. Parte-se agora para o uso de testes estatísticos para verificar se existem diferenças significativas entre as médias dos volumes obtidos pela aplicação da modelagem em diferentes dados oriundos da filtragem.

Para a comparação de mais de duas médias é recomendado a aplicação da estatística "F", que pode ser obtida na análise de variância (VIEIRA, 1991). Porém, essa análise só deve ser realizada quando verificado o pressuposto de que existe homogeneidade das variâncias.

Com o objetivo de verificar se as variâncias são homogêneas foi optado pela aplicação do teste de Bartlett. A aplicação do teste resulta em um valor de χ^2 (qui-quadrado) que posteriormente é comparado com o valor tabelado. Quando o valor obtido é menor ou igual ao valor da tabela conclui-se que as variâncias são homogêneas.

Analisando os dados para aplicação do teste de comparação de médias, a fim de verificar a homogeneidade de variâncias como requisito para realização do teste, foi observado que o conjunto de árvores selecionadas apresentava uma amplitude diamétrica de aproximadamente 8,7 cm, com diâmetro mínimo de 9,8 cm, medido com a suta, e diâmetro máximo de 18,5 cm, medido com a fita métrica.

A amplitude encontrada e os valores de diâmetros das árvores caracterizaram o conjunto de dados para a divisão em duas classes de diâmetro. Um limite de diâmetro a altura do peito de 15 cm foi definido para o agrupamento (GRUPO 1 > 15 cm ≤ GRUPO 2) sendo as árvores agrupadas de acordo com o QUADRO 7.

GRUPO 1 (d>15 cm)	GRUPO 2 (d≤15 cm)
1	2
6	3
7	4
10	5
11	8
12	9

QUADRO 7 - DIVISÃO DOS GRUPOS DE ACORDO COM A CLASSE DIAMÉTRICA.
FONTE: O Autor (2012)

Esta divisão proporcionou a homogeneidade das variâncias e delineou um experimento em blocos ao acaso. A análise de variância foi então aplicada, sendo configurado como blocos os dois grupos de árvores e como tratamentos, as diferentes metodologias de filtragem submetidas a modelagem tridimensional. Os valores de da estatística "F" para os blocos e posteriormente para a interação entre cada tratamento dentro do bloco foram avaliados.

$$F = \frac{QMTr}{QMR} \quad (12)$$

Onde: F = valor tabelado da estatística F;

$QMTr$ = Quadrado médio dos tratamentos;

QMR = Quadrado médio dos resíduos.

Obtido o valor de "F" calculado compara-se o resultado ao valor de "F" tabelado para um determinado limite de probabilidade fixada (95% para este trabalho), quando F calculado for maior que F tabelado, significa que estão ocorrendo diferenças entre as médias dos tratamentos.

Quando o resultado da análise de variância de um experimento demonstra que as médias de tratamento não são estatisticamente iguais, é apenas lógico perguntar quais as médias diferem entre si, para isso pode ser aplicado o teste de comparação de médias por um método que forneça a diferença mínima significativa entre duas médias (VIEIRA e HOFFMANN, 1989).

Com o objetivo de identificar a diferença mínima significativa entre médias foi aplicado o teste de comparação de médias de *Tukey*. O teste utiliza os valores críticos da *amplitude studentizada* para realização de cálculo da diferença mínima significativa existente entre duas médias, que é calculada pela seguinte expressão:

$$W = q_{\alpha} \sqrt{\frac{QM_{Erro}}{r}} \quad (13)$$

Onde:

W = diferença m

QM_{Erro} = é o quadrado médio do erro obtido na análise de variância

r = número de repetições das médias sendo comparadas

q_{α} = é um valor tabelado em função do número de médias comparadas e o grau de liberdade do erro experimental (GLErro)

O valor de " W " calculado é considerado como parâmetro de comparação da diferença entre duas médias. Quando o valor encontrado for maior ou igual a W , implica que as médias são estatisticamente diferentes a um nível " α ".

Para cada média comparada é atribuído uma identificação quanto a existência de diferença significativa. Quando os valores médios entre os tratamentos não apresentarem diferença significativa estes serão representados pela mesma letra e quando da existência da diferença deve-se atribuir letras diferentes aos tratamentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aqui apresentados descrevem o comportamento da nuvem de pontos submetida a aplicação dos métodos de filtragem desenvolvidos e implementados neste trabalho por meio de rotinas computacionais.

4.1 Análise qualitativa

A investigação da eficiência dos métodos de filtragem foi realizada, em um primeiro momento, pela análise visual. Para ilustrar os resultados, os indivíduos foram aleatoriamente escolhidos dentre o conjunto de 12 árvores, permitindo a averiguação da filtragem. Desta forma, antevendo os resultados da aplicação das rotinas de filtragem é demonstrado o registro fotográfico da árvore 12 (FIGURA 34).



FIGURA 34 - MEDIÇÃO *LASER* DA ÁRVORE 12
FONTE: O Autor (2012)

De acordo com o registro fotográfico, é possível descrever que o tronco da árvore 12 apresenta tortuosidade e uma copa densa de acículas composta por galhos secos em sua parte inferior.

A disposição da nuvem de pontos de medição *laser* bem como os resultados da aplicação dos métodos de filtragem desenvolvidos neste trabalho pode ser observada na FIGURA 35.

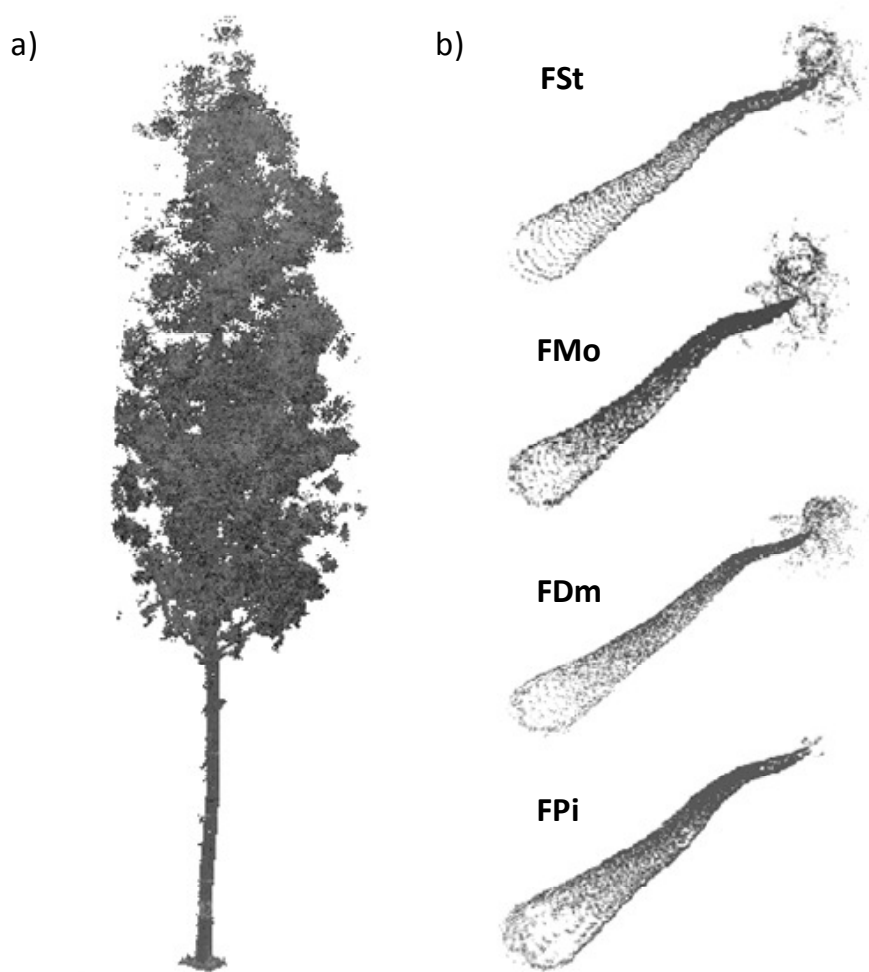


FIGURA 35 - NUVEM DE PONTOS: (a) ÁRVORE ORIGINAL, (b) PRODUTOS DA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FILTRAGEM DESENVOLVIDOS - 45°.

FONTE: O Autor (2012)

* FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

Na FIGURA 35a, pode ser verificado que a nuvem de pontos da árvore 12 apresenta pequenos galhos na parte inferior do tronco e uma copa relativamente densa. Na FIGURA 35b, para melhor visualização de detalhes do tronco, os resultados da filtragem foram ilustrados com uma inclinação de 45°.

Em primeiro contato com os dados foi constatado que as rotinas de filtragem foram eficientes para eliminação dos galhos dispersos na parte inferior do tronco e que os métodos propostos conseguiram eliminar a copa em proporções determinadas referentes a altura total da árvore.

Outra característica importante e que chama a atenção na análise visual é o comportamento da filtragem quanto a forma do tronco e que o mesmo foi fielmente representado em todos os métodos.

O aspecto visual da nuvem de pontos original da árvore 7, o método de filtragem semi-automático, e os métodos de filtragem automáticos são apresentados na FIGURA 36.

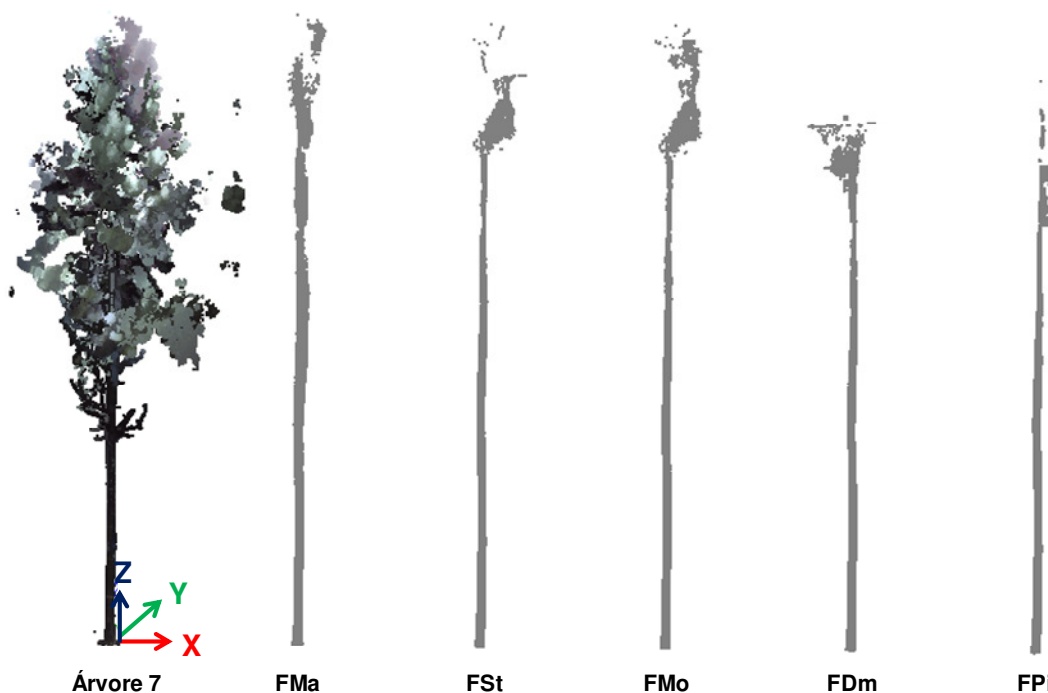


FIGURA 36 - NUVEM DE PONTOS DA ÁRVORE E METODOLOGIAS DE FILTRAGEM APLICADAS
 FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado;
 FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

A ilustração define a nuvem de pontos da árvore 7 submetida a aplicação dos métodos de filtragem. Realizando uma análise descritiva, da esquerda para direita, a primeira nuvem de pontos representa a árvore de interesse para filtragem e pontos de indivíduos adjacentes.

De acordo com a FIGURA 36, o método semi-automático (FMa) encontra problemas para a filtragem de dados do tronco no momento em que a copa torna-se muito densa. Este resultado evidencia problemas no processamento de dados citados por Silva (2011) e Martins Neto (2011), que relataram a superestimação dos diâmetros na parte superior do tronco quando aplicado a filtragem manual.

A nuvem de pontos produzida pela aplicação dos filtros FSt e FMo, apresentou resultado semelhante quanto a forma e disposição dos dados, porém o Filtro Seções Transversais Modificado representou uma nuvem de pontos mais densa que o Filtro Seções Transversais. Este resultado é esperado, visto a natureza do algoritmo empregado na implementação computacional dos filtros.

Os Filtros FDM e FPI destacam-se por apresentarem nuvem de pontos de dados filtrados até uma certa altura do tronco relativamente menor do que as demais metodologias de filtragem. Entretanto, os pontos gerados por estas metodologias parecem representar melhor o afilamento da árvore.

Diante do exposto, é constatado que os métodos de filtragem, inicialmente, cumprem com objetivo de filtragem de pontos que não representam a superfície do tronco, contudo, é preciso que se faça uma investigação minuciosa sobre o comportamento da filtragem, isto é, em diferentes partes do tronco da árvore.

Para verificar a presença de pontos dispersos (D) e a ausência de pontos da superfície do tronco (I) foram confeccionados quadros e atribuído pontuação unitária quando observada alguma dessas características na nuvem de pontos filtrada e analisada em diferentes partes do tronco: base, 50 e 75% da altura total e ponta.

A pontuação foi organizada em forma de quadros e uma escala de cor atribuída aos resultados. A cor verde refere-se a pontuação mínima e a pontuação máxima é representada pela cor vermelha. A coloração amarela representa uma pontuação intermediária (FIGURA 37).

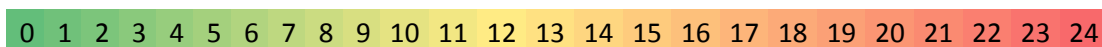


FIGURA 37 - ESCALA DE CORES PARA O SOMATÓRIO DE LINHAS E COLUNAS
 FONTE: O Autor (2012)

Para melhor compreensão, os métodos foram apresentados em ordem crescente de pontuação dentro dos quadros (*ranking*). Quanto menor a pontuação melhor é o resultado da filtragem. O somatório das colunas indica o comportamento do método de filtragem para o conjunto de árvores e o somatório das linhas permite identificar o comportamento dos métodos de filtragem para cada árvore.

O QUADRO 8 apresenta os resultados classificados em ordem crescente de pontuação referente à identificação dos problemas da filtragem na porção correspondente a base da árvore para as 12 árvores submetidas aos cinco métodos de filtragem.

ÁRVORE	BASE										SOMA
	FSt		FMo		FDm		FPi		FMa		
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
8	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
11	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
12	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
9	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	2
5	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	3
6	-	-	1	-	1	-	1	-	1	-	4
10	-	-	-	-	1	1	1	1	1	-	5
1	1	-	1	-	1	-	1	1	1	-	6
2	1	-	1	-	1	-	1	1	-	1	6
SOMA	2		4		5		8		11		
RANKING	1º		2º		3º		4º		5º		

QUADRO 8 - PROBLEMAS DA FILTRAGEM NA PORÇÃO CORRESPONDENTE A BASE DA ÁRVORE

FONTE: O Autor (2012)

* FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados; FMa - Filtro Manual.

Os resultados da filtragem apontam que o Filtro Seções Transversais (FSt) apresenta a menor quantidade de árvores com pontos dispersos e dados incompletos. Isto pode ser atribuído a natureza do filtro de selecionar os pontos mais próximos e permitir a repetição.

A presença constante de pontos dispersos e dados incompletos nas árvores um e dois despertaram a atenção. Investigou-se então a nuvem de pontos original e o registro fotográfico de campo (FIGURA 38).



Árvore 1

Árvore 2

FIGURA 38 - REGISTRO FOTOGRÁFICO REFERENTE A BASE DAS ÁRVORES UM E DOIS
 FONTE: O Autor (2012)

De acordo com a FIGURA 38, pode-se inferir que os dados dispersos e as partes incompletas encontradas na análise visual, para árvore um, estão atrelados a disposição do indivíduo quanto ao desnível encontrado no terreno. Na segunda estação *laser*, os dados da varredura iniciaram em uma parte superior em relação a base da árvore do que na primeira estação que contemplou o ponto de vista desta fotografia, resultando em pontos dispersos para a primeira fatia de processamento da árvore.

Problemas com essa temática foram destacados por Biernert *et al*; (2006b), que trabalharam a possibilidade de encontrar dados da superfície do relevo que certamente serão confundidos com pontos do início do tronco. Os autores recomendaram o ajuste de um plano que represente o modelo digital do terreno nessas condições e que o ponto de cota máxima deste plano seja adotado como referência espacial do início do tronco.

Já para árvore dois, os problemas encontrados referem-se a um pequeno pedaço do tronco de uma árvore que estava encostada junto a base da mesma. Os

métodos de filtragem automáticos apresentaram pontos dispersos e ainda os filtros Pontos Indexados e Manual suprimiram dados pertencentes ao tronco por influência do pedaço de árvore adjacente.

Dentre os métodos avaliados, o Filtro Manual foi o que obteve a maior pontuação para a base da árvore, sendo que o maior problema apontado é a quantidade de pontos dispersos.

O Filtro Pontos Indexados foi o que apresentou a maior pontuação para as partes incompletas. Este resultado está atrelado ao algoritmo utilizado por este método, ou seja, a necessidade de selecionar pontos sem repetição e ter um desvio padrão das distâncias euclidianas em relação ao centro estabilizado.

Sendo observada a árvore 10, que apresentou pontuação intermediária assinalando dados incompletos e pontos dispersos para o FDM e FPI, foi investigado o possível problema buscando as anotações de campo, onde pode ser constatado que havia uma deformação (cicatriz) que pode ter ocasionado pontos dispersos e dados incompletos.

O QUADRO 9 apresenta os resultados da análise visual da nuvem de pontos para a porção correspondente a parte superior da base da árvore até um limite de 50% da altura total.

ÁRVORE	FDm		FPi		50% FMo		FSt		FMa		SOMA
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
5	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
6	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
7	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
11	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	2
1	1	-	-	-	-	-	-	-	1	1	3
10	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	3
9	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	6
12	-	-	-	1	1	1	1	-	1	1	6
3	1	-	1	1	1	1	1	1	-	1	8
SOMA	2		4		6		7		13		
RANKING	1°		2°		3°		4°		5°		

QUADRO 9 - PROBLEMAS DA FILTRAGEM PARA A PORÇÃO CORRESPONDENTE A 50% DA ALTURA TOTAL DA ÁRVORE

FONTES: O Autor (2012)

* FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados; FMO - Filtro Seções Transversais Modificado; FSt - Filtro Seções Transversais; FMA - Filtro Manual.

A nuvem de pontos quando analisada na porção correspondente ao limite de 50% da altura total da árvore apresentou como melhores métodos de filtragem o FDM e FPI, que notavelmente inverteram suas posições em relação aos filtros FSt e FMo quando analisados na base da árvore. O Filtro Manual apresenta a maior pontuação novamente.

O aumento no número de pontos dispersos e de dados incompletos já era esperado pois para o conjunto de dados estudados, os quais não receberam tratamentos silviculturais, é onde se inicia a copa.

A árvore três apresentou uma pontuação intrigante, apontando problemas em todos os métodos de filtragem. Para esclarecer este resultado foi confeccionada a FIGURA 39 com os dados da filtragem neste ponto da análise.

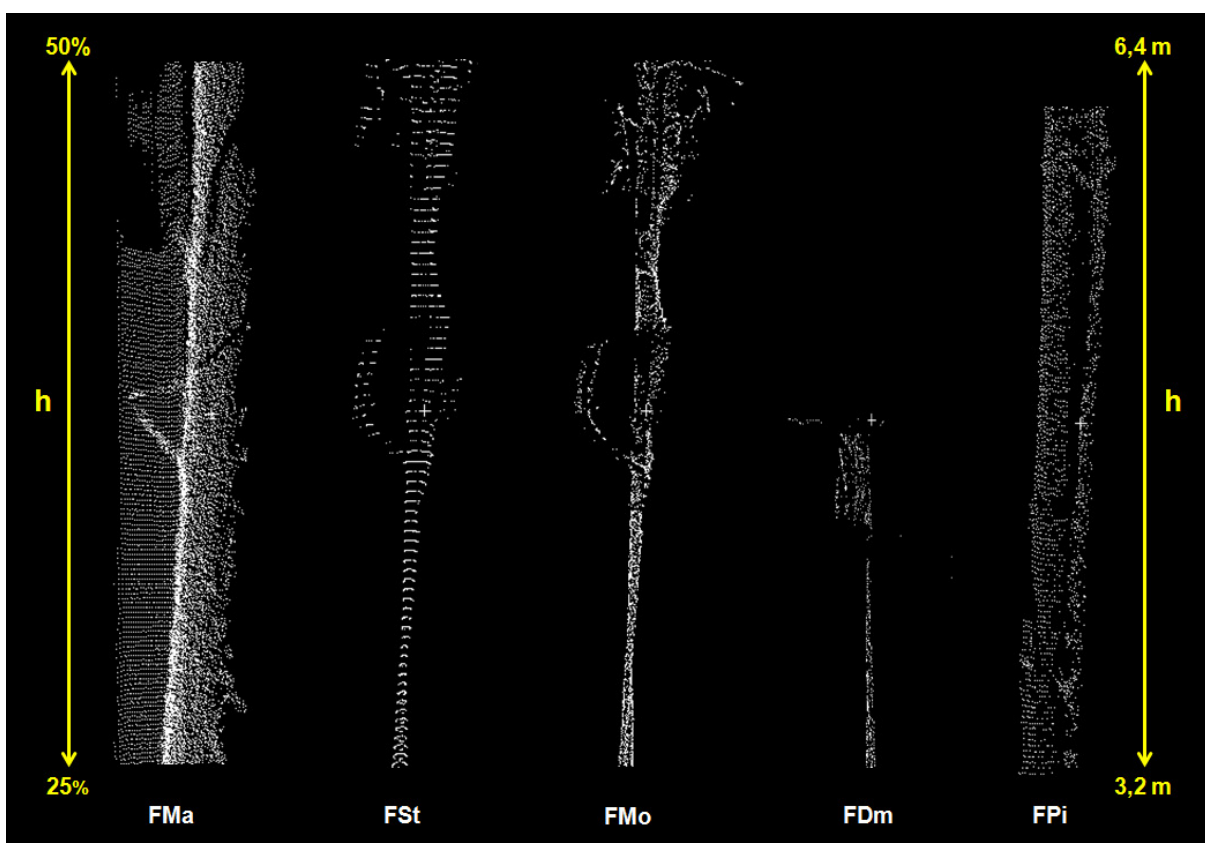


FIGURA 39 - NUVEM DE PONTOS PRODUZIDA PELA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FILTRAGEM NA PORÇÃO 50% DA ALTURA TOTAL PARA ÁRVORE TRÊS
 FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

Ao analisar a FIGURA 39 pôde ser visualizado que os dados filtrados apresentam problemas e que nenhum método conseguiu manter a forma do tronco da árvore. Desta forma, a investigação passou a ser na nuvem original (FIGURA 40).

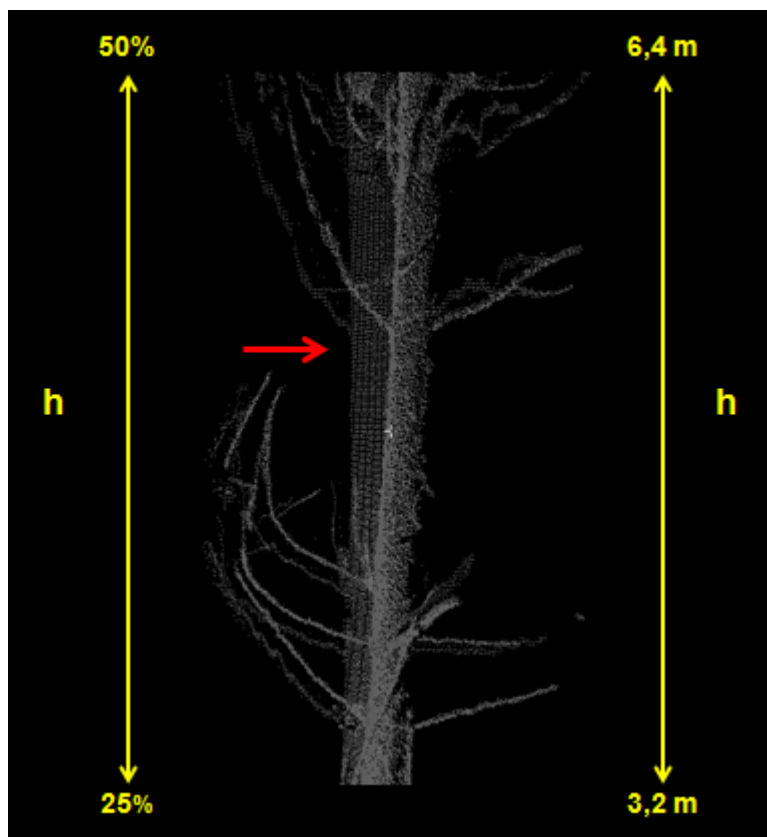


FIGURA 40 - NUVEM DE PONTOS ORIGINAL NA PORÇÃO 50% DA ALTURA TOTAL PARA ÁRVORE TRÊS
FONTE: O Autor (2012)

A disposição destes dados demonstra claramente que a medição *laser* desta árvore foi comprometida pela ação do vento. A árvore estabelece um eixo vertical perpendicular ao plano da base do terreno. A presença do vento move o tronco da árvore ocasionando o deslocamento deste eixo, o que resulta em uma nuvem de pontos deslocada.

No QUADRO 9 é verificada uma tendência do Filtro Manual em apresentar pontos dispersos na nuvem de pontos que deveria representar o tronco, como ocorreu na base da árvore. Contudo, também são encontradas partes incompletas em maior quantidade.

A análise dos dados para filtragem a 75% da altura total da árvore e a pontuação atribuída aos pontos dispersos e dados incompletos são apresentados no QUADRO 10.

ÁRVORE	75%										SOMA	
	FDm		FMo		FPi		FSt		FMa			
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I		
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
7	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	3
8	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	3
6	-	-	1	1	1	1	-	-	1	-	-	5
12	-	-	-	-	1	1	-	1	1	1	1	5
9	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-	-	7
11	-	1	1	1	-	-	1	1	1	1	1	7
4	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1	9
5	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
10	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	9
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
SOMA	8		15		16		18		19			
RANKING	1º		2º		3º		4º		5º			

QUADRO 10 - PROBLEMAS DA FILTRAGEM PARA A PORÇÃO CORRESPONDENTE A 75% DA ALTURA TOTAL DA ÁRVORE

FONTE: O Autor (2012)

* FDM - Filtro Distância máxima; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FPi - Filtro Pontos Indexados; FSt - Filtro Seções Transversais; FMa - Filtro Manual.

Valores elevados de pontuação para os métodos de filtragem apontam a grande influência da copa nesta porção analisada. Esta propriedade fica evidenciada pelo resultado fornecido pela árvore dois, que é uma árvore seca, portanto, é composta por uma pequena quantidade de galhos e desprovida de acículas (FIGURA 41).



FIGURA 41 - NUVEM DE PONTOS E REGISTRO FOTOGRÁFICO DA COPA DA ÁRVORE DOIS
 FONTE: O Autor (2012)

O resultado para a pontuação da árvore dois deixa claro a influência da copa nos métodos de filtragem. O problema não seria a aplicação do método, mas sim a ausência de dados que representam a superfície do tronco pela interposição da copa entre o pulso *laser* e o tronco da árvore.

O FDM é destacado novamente, sua pontuação é cerca de 50% menor que a dos demais filtros. Comparando os resultados do FDM com o FPI, pode-se inferir que a repetição de pontos é benéfica para os resultados da filtragem.

A filtragem FMO, apesar de estar na segunda colocação, apresenta uma pontuação e comportamento similar ao FPI, não representando um método diferencial para filtragem na parte do tronco analisada.

O Filtro Manual apresenta mais uma vez a maior pontuação, cabe destacar que são encontrados pontos dispersos em todos os indivíduos e que ocorre um acréscimo no número de árvores com partes incompletas.

A finalização da análise visual dos problemas da filtragem é apresentada no QUADRO 11 que representa os resultados para a ponta da árvore.

ÁRVORE	PONTA %										SOMA
	FMa		FDm		FMo		FSt		FPi		
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	
2	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
6	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2
5	-	-	1	-	1	-	-	-	1	1	4
8	1	-	-	-	-	1	-	1	1	1	5
11	1	-	1	-	1	-	1	-	-	1	5
7	1	-	-	1	-	1	1	1	-	1	6
10	1	-	1	1	1	-	1	-	-	1	6
4	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	8
9	1	-	1	1	1	-	1	1	1	1	8
12	1	1	1	-	1	1	1	1	1	-	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	9
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
SOMA	11		14		14		16		17		
RANKING	1º		2º		3º		4º		5º		

QUADRO 11 - PROBLEMAS DA FILTRAGEM PARA A PORÇÃO CORRESPONDENTE A 75% DA ALTURA TOTAL DA ÁRVORE

FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FDM - Filtro Distância máxima; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FSt - Filtro Seções Transversais; FPi - Filtro Pontos Indexados.

A árvore dois apresentou novamente a menor pontuação, devido aos motivos já explicados em 75% da altura total. Neste momento da análise, deve-se tomar cuidado quanto a avaliação de partes incompletas pois este quesito não deve ser considerado quando os dados analisados não representarem a forma de um tronco.

O Filtro Manual foi o melhor para a ponta da árvore. Este resultado pode ser explicado pela capacidade do olho humano em distinguir os pontos que fazem parte do tronco mesmo com a influência de muitos pontos dispersos nesta porção.

Os filtros Seções Transversais Modificado e Distância Máxima apresentaram comportamento semelhante e igual pontuação quanto a pontos dispersos e partes incompletas. As pontuações para os filtros Seções Transversais e Pontos Indexados foram maiores porém, não se pode dizer que exista uma diferença clara entre os métodos automáticos quanto aos problemas de filtragem.

Para finalizar a análise foi confeccionado um *ranking* com objetivo de verificar o método de filtragem que apresenta os melhores resultados para o processamento da filtragem. Os métodos foram ordenados de acordo com o seu

desempenho para determinada seção do tronco, podendo assumir valores de um a cinco na escala de classificação. A classificação dos diferentes métodos de filtragem submetidos à análise visual pode ser observada no QUADRO 12.

POSIÇÃO	FILTRO	SEÇÕES DO TRONCO			
		BASE	50%	75%	PONTA
1	FDm	3	1	1	2
2	FMo	2	3	2	3
3	FSt	1	4	4	4
4	FPi	4	2	3	5
5	FMa	5	5	5	1

QUADRO 12 - *RANKING* DE DESEMPENHO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE FILTRAGEM SUBMETIDOS À ANÁLISE VISUAL
 FONTE: O Autor (2012)

A ordem de classificação foi estabelecida de acordo com os melhores resultados para cada seção do tronco analisada, sendo o Filtro Distância Máxima eleito na primeira colocação quando considerado uma análise geral dos métodos de filtragem. Em contrapartida o filtro manual alcançou a última colocação no *ranking*.

Quando considerada o desempenho da filtragem em cada seção do tronco, os métodos de filtragem alternaram suas posições no *ranking* para a primeira colocação. A base do tronco foi mais bem representada pela nuvem de pontos produzida pelo Filtro Seções Transversais; para 50% e 75% da altura total da árvore o melhor resultado foi alcançado pelo Filtro Distância Máxima e como diferencial, a ponta da árvore teve o Filtro Manual como melhor método.

O Filtro Seções Transversais Modificado não apresentou oscilação quanto ao seu posicionamento na classificação, mantendo-se sempre em segundo e terceiro lugar. Já o Filtro Pontos Indexados esteve oscilando de posição em cada parte do tronco, não sendo possível caracterizá-lo por uma tendência. O Filtro Seções Transversais, apesar de ter alcançado o primeiro lugar para a base da árvore, apresenta-se em 4º lugar para todas as demais posições do tronco. Em último lugar, da porção da base a 75% da altura total está o Filtro Manual.

4.2 Análise quantitativa

4.2.1 A nuvem de pontos do tronco

As árvores submetidas ao processamento de dados apresentaram quantidade de pontos diferenciadas. O número total de pontos bem como o diâmetro a altura do peito e a altura total da árvore são apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 - NÚMERO DE PONTOS DA NUVEM ORIGINAL PARA O CONJUNTO DE ÁRVORES

ÁRVORE	PONTOS (n)	d (cm)	h (m)
1	1772735	17,7	15,2
2	879389	14,4	14,1
3	331974	9,9	11,0
4	353994	12,1	14,1
5	387169	11,6	14,3
6	447419	15,5	14,1
7	1191101	17,9	17,7
8	554105	12,5	12,4
9	638400	10,2	14,5
10	1724032	18,0	15,3
11	856096	15,6	14,1
12	934449	17,7	15,2
Média	839239	14,3	14,3
CV_(%)	60%	21%	11%

FONTE: O Autor (2012)

De acordo com a tabela pode ser verificado que existe uma relação positiva entre as árvores de maiores valores para a variável diâmetro a altura do peito e a elevada quantidade de dados nesses indivíduos. A grande variação na quantidade de pontos é expressa pelo coeficiente de variação.

A variação do número de pontos pode ser atribuída aos diferentes formatos de copa e a proximidade de árvores vizinhas, que acabavam tendo seus pontos misturados a nuvem de pontos da árvore de interesse.

Os valores percentuais médios de pontos selecionados por meio da aplicação de rotinas de filtragem em relação ao número total de pontos do conjunto de dados foram calculados para que fosse possível realizar uma comparação entre a quantidade de pontos pré e pós aplicação dos métodos de filtragem. A representação gráfica dos resultados pode ser visualizada na FIGURA 42.

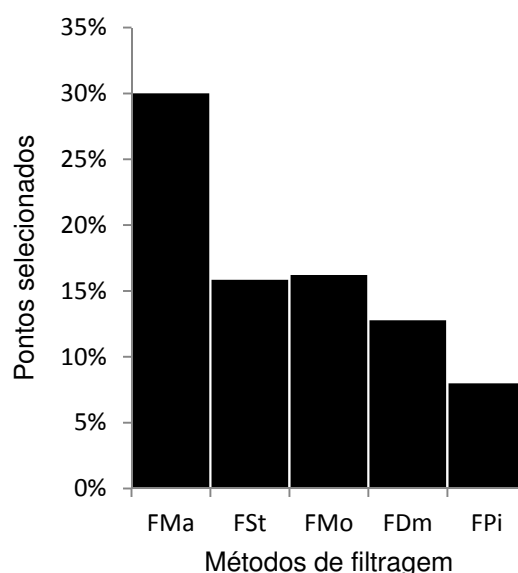


FIGURA 42 - PERCENTUAL MÉDIO DE PONTOS SELECIONADOS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE ROTINAS DE FILTRAGEM.

FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

O Filtro Manual apresentou o maior percentual de pontos selecionados em relação ao número total de dados da nuvem de pontos original da árvore. Essa característica confirma os resultados apontados na análise visual.

Os filtros Seções Transversais e Seções Transversais Modificado apresentaram resultados aproximados quanto ao número de pontos selecionados, esse valor era esperado dado a semelhança entre os algoritmos.

A quantidade de pontos é consideravelmente reduzida quando se observa os resultados dos filtros Distância Máxima e Pontos Indexados. Isso indica que a busca por estabilizar o desvio padrão resulta na remoção de muitos pontos da nuvem original. O Filtro Pontos Indexados, que em sua essência não permite a repetição de pontos, apresenta uma quantidade de dados ainda menor.

Em decorrência destes resultados foi necessário avaliar o aspecto repetição de pontos. Uma simples rotina que verificava os pontos com coordenadas repetidas, comparando um a um na nuvem de pontos filtrada, foi aplicada. Os resultados percentuais relativos à repetição de pontos selecionados estão representados graficamente na FIGURA 43.

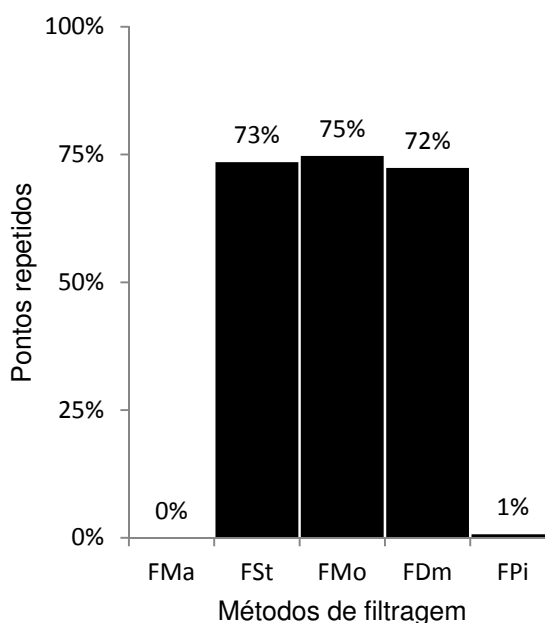


FIGURA 43 - PERCENTUAL MÉDIO DE PONTOS REPETIDOS

FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPi - Filtro Pontos Indexados.

Como esperado, a Filtragem Manual não apresenta pontos com os mesmos valores de coordenadas nas três dimensões (X, Y, Z). Em contrapartida, os valores percentuais de repetição de pontos para os métodos FSt, FMo e FDm são elevados FIGURA 43. Este resultado poderia representar um problema quando se deseja manter a forma do tronco, porém essa suposição pôde ser descartada durante a análise visual.

O Filtro Pontos Indexados apresenta uma quantidade de dados repetidos muito pequena. Este resultado pode despertar confusão, pois se o filtro foi desenvolvido para não repetir pontos, como é apontada a existência de dados repetidos? Isso se deve ao fato de que no processamento da primeira fatia, a restrição de não repetição de pontos está desativada. Isto é necessário devido à presença de pontos da superfície do terreno no primeiro processamento, podendo acarretar em seleção de dados que não fazem parte do tronco e o ajustamento equivocado quando se aplica o Procedimento circunferência ótima.

O percentual médio de pontos filtrados sem contabilizar os dados repetidos pelos métodos de filtragem é apresentado na FIGURA 44.

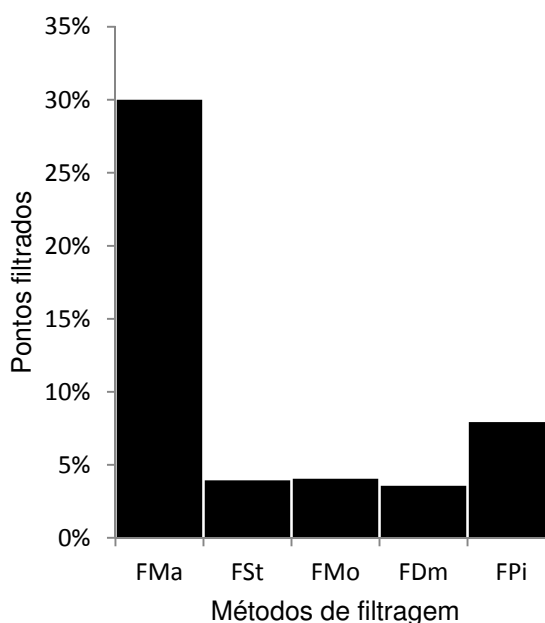


FIGURA 44 - PERCENTUAL MÉDIO DE PONTOS DO TRONCO NÃO REPETIDOS EM RELAÇÃO AOS PONTOS DA NUVEM TOTAL DA ÁRVORE.

FONTES: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPi - Filtro Pontos Indexados.

O percentual de pontos selecionados para o Filtro Manual apresenta o mesmo resultado, 30%, obtido na FIGURA 42, valor esperado já que não ocorre a repetição de pontos neste método.

Os métodos de filtragem FSt, FMo e FDm apresentaram os menores valores percentuais, menos de 5%, de seleção de pontos do tronco em relação a nuvem de pontos total da árvore.

Em relação às metodologias de filtragem automáticas, o Filtro Pontos Indexados apresentou a maior quantidade de pontos do tronco selecionados, acima de 5%. Contudo, como avaliado na análise visual, o FPI não é apontado como a melhor metodologia de filtragem.

Diante destes resultados é preciso investigar se as nuvens de pontos produzidas pelos métodos que apresentaram maior quantidade de pontos do tronco permitem obter resultados melhores na modelagem tridimensional.

Os valores de referência para a análise da filtragem quanto a altura total da árvore, altura do início da copa e o limite da porção composta pelo tronco e presença de alguns galhos foram extraídos diretamente da nuvem de pontos e são demonstrados graficamente na FIGURA 45.

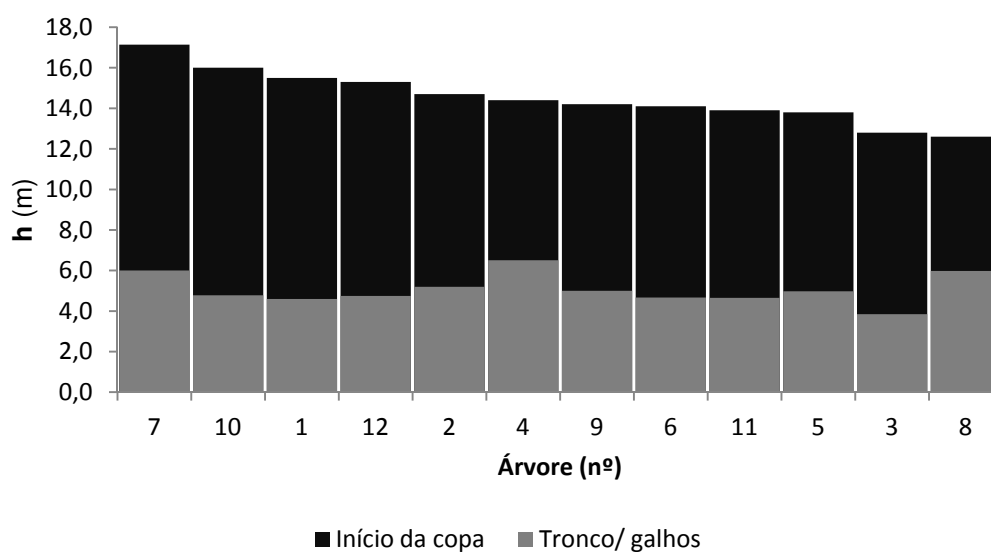


FIGURA 45 - VALORES EXTRAÍDOS DA MEDIÇÃO LASER
 FONTE: O Autor (2012)

As árvores foram agrupadas em ordem decrescente de altura. O que pode ser verificado é o início da copa está no limite de quatro metros de altura, antes disso, todas as árvores apresentam a superfície do tronco com a presença de galhos secos.

O percentual da superfície filtrada foi determinado pelo limite de dados que caracterizavam a forma de um tronco. Desta forma, foram avaliadas as 12 árvores

do conjunto quanto a altura relativa dos pontos filtrados em relação a altura total da árvore (FIGURA 46).

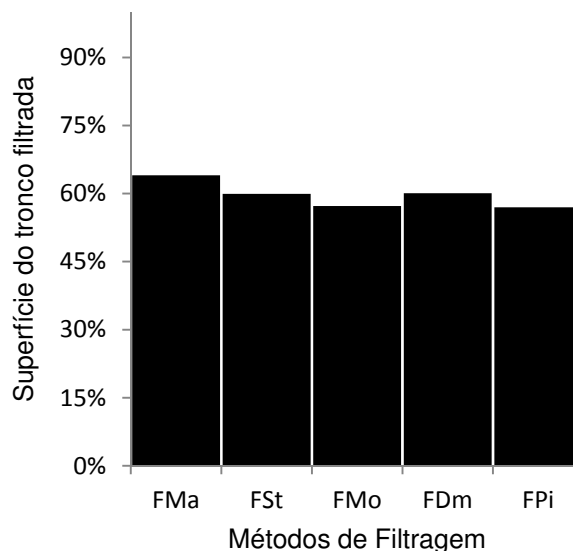


FIGURA 46 - PERCENTUAL DE SUPERFÍCIE DO TRONCO FILTRADA

FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

De acordo com o gráfico, pode-se inferir que o limite alcançado pelos métodos de filtragem para o isolamento do tronco está próximo dos 60% da altura total da árvore para o conjunto de dados utilizados nesta pesquisa.

4.2.2A modelagem do tronco

A modelagem do tronco aplicada em cada nuvem de pontos filtrada disponibilizou a variável volume, que foi utilizada como parâmetro comparador dos dados disponibilizados pelos métodos de filtragem.

O procedimento empregado para realizar a modelagem foi a divisão da nuvem de pontos da árvore filtrada para obtenção dos dados em toras de um metro de comprimento.

Na FIGURA 47 pode ser observado as etapas do o processamento da nuvem de pontos e que o procedimento "Toras", descrito na metodologia, separou corretamente o tronco da árvore .

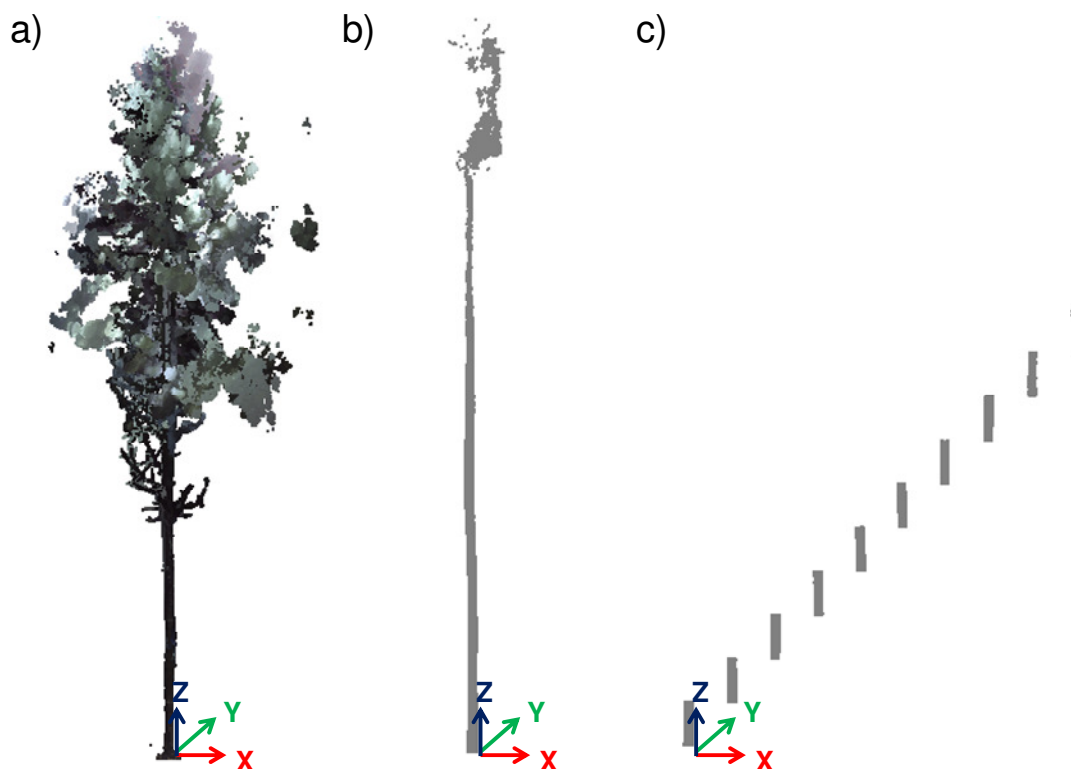


FIGURA 47 - PROCESSAMENTO DA NUVEM DE PONTOS: (a) NUVEM DE PONTOS ORIGINAL, (b) NUVEM FILTRADA, (c) DIVISÃO EM TORAS
FONTE: O Autor (2012)

A disposição dos pontos em toras de um metro de comprimento e o aspecto da modelagem tridimensional da primeira seção da árvore sete podem ser observados em detalhe nas FIGURA 48 e FIGURA 49.

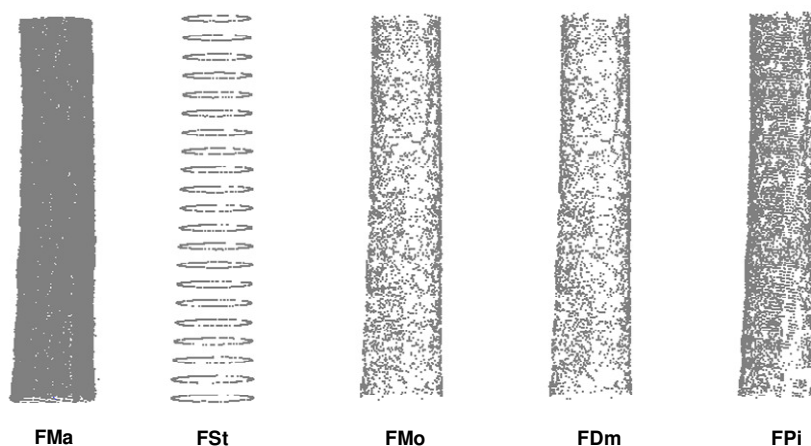


FIGURA 48 - ÁRVORE 7 - PRIMEIRA TORA FILTRADA POR DIFERENTES MÉTODOS
 FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

A FIGURA 48 representa a disposição dos dados obtidos pela aplicação dos métodos de filtragem desenvolvidos neste trabalho. Nela fica evidenciado que a maior densidade de pontos é encontrada nos métodos Manual e Pontos Indexados.

Os filtros Seções Transversais Modificado e Distância Máxima apresentam resultados semelhantes quanto a disposição dos dados na nuvem de pontos, não sendo possível identificar diferenças pela análise da primeira tora. O Filtro Seções Transversais é representado por pontos organizados em formas livres que representam o aspecto de uma circunferência.

O aspecto resultante da modelagem tridimensional realizada pelo o processo de rede triangular irregular pode ser visualizado para cada método de filtragem na FIGURA 49.

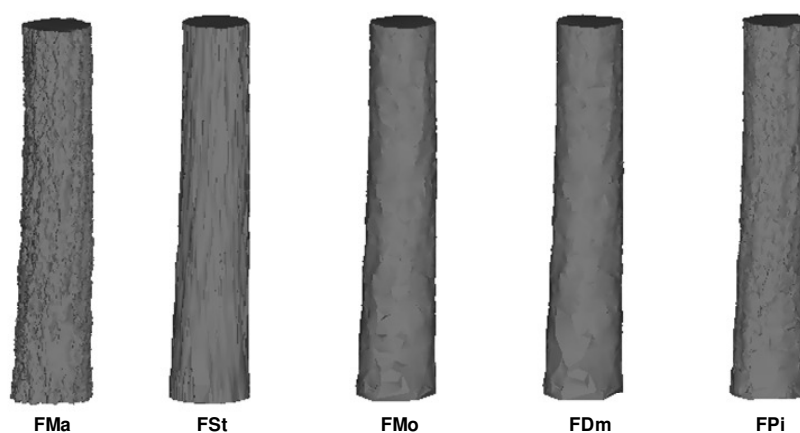


FIGURA 49 - ÁRVORE 7 - PRIMEIRA TORA MODELADA A PARTIR DE DADOS DE DIFERENTES MÉTODOS DE FILTRAGEM

FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

O Filtro Manual e Filtro Pontos Indexados tem em comum a rugosidade da superfície modelada. Este aspecto pode ser descrito pela alta densidade de pontos combinada ao número elevado de triângulos obtidos pelo procedimento de modelagem utilizando a rede triangular irregular.

Os filtros Seções Transversais Modificado e Distância Máxima apresentam uma superfície modelada suavizada. Este aspecto é alcançado pela redução da densidade de pontos que têm como consequência uma menor quantidade de triângulos na malha tridimensional. O Filtro Seções Transversais apresenta um padrão de linhas paralelas que dão o aspecto da formação de sulcos na tora modelada.

O número de toras modeladas tridimensionalmente foi comparado ao número de toras medidas utilizando o xilômetro. Esta comparação é necessária já que não é possível obter o volume das seções individuais que localizadas próximo ao ápice da árvore utilizando o método do deslocamento de água. A TABELA 3 apresenta o número de toras medidas pelo método do deslocamento de água e a FIGURA 50 apresenta o percentual de toras modeladas tridimensionalmente relativas ao número de toras xilometradas.

TABELA 3 - NÚMERO DE TORAS MEDIDAS PELO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE ÁGUA (XILÔMETRO)

ÁRVORE (nº)	XILÔMETRO (nº de toras)
3	9
8	9
9	9
2	10
5	10
4	11
6	11
1	12
10	12
11	12
12	12
7	14

FONTE: O Autor (2012)

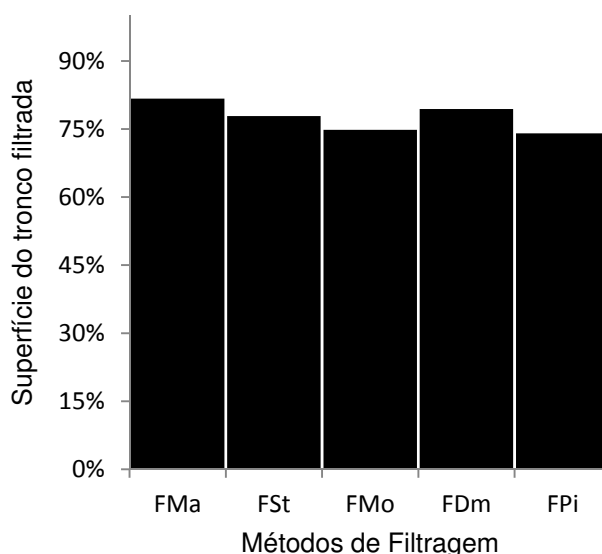


FIGURA 50 - PERCENTUAL DE TORAS MODELADAS EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE TORAS XILOMETRADAS

FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPi - Filtro Pontos Indexados.

É importante ressaltar que o volume obtido com o Xilometro para toras de um metro é alcançado somente até determinada altura da árvore, sendo necessário colocar mais de uma tora para conseguir o valor paramétrico quando as seções são pouco espessas.

Os métodos de filtragem Manual e Distância Máxima apresentaram o maior número de toras modeladas tridimensionalmente, porém, essa diferença não foi expressiva em relação aos demais. Os resultados apontam que a modelagem tridimensional atingiu 75% do número de toras xilometradas. Este resultado pode ser atribuído à ausência de pontos que representem a ponta do tronco devido sobreposição pelas acículas da copa.

A variável volume foi utilizada para a validação dos métodos de filtragem e para comparação com os valores obtidos na cubagem rigorosa. O desvio relativo ao somatório das seções xilometradas de acordo com a posição da tora no tronco são apresentados na TABELA 4.

TABELA 4 - VOLUME DE TORAS MODELADAS TRIDIMENSIONALMENTE

SEÇÃO	Árvores (nº)	VOLUME (m ³)	ERRO RELATIVO AO VOLUME DO XILOMETRO (%)						
		Xilômetro	Huber (F)	Huber (S)	FMa	FSt	FMo	FDm	Fpi
1	12	0,2320	-9,5	-2,5	-2,4	-8,8	-6,4	-3,8	1,4
2	12	0,1810	-13,3	-9,5	-6,6	-6,6	-4,9	-2,0	-1,5
3	12	0,1740	-11,2	-4,7	-5,3	-5,3	-3,4	-1,1	-1,5
4	11	0,1650	-8,0	-0,1	-5,8	0,8	-2,4	0,3	-0,6
5	11	0,1495	-9,9	-1,8	-22,6	-6,4	-10,0	-7,2	-7,8
6	10	0,1400	-4,5	1,0	-13,9	-3,8	-6,3	-0,8	-2,7
7	10	0,1250	-3,8	3,8	-6,5	-5,3	-7,8	-4,8	-2,4
8	9	0,0965	-8,5	0,1	-20,3	-14,6	-11,2	-7,4	-10,3
9	6	0,0610	-0,2	8,5	11,3	-0,2	1,0	7,0	-2,3
TOTAL	93	1,324	-8,5	-1,7	-8,3	-5,7	-5,8	-2,6	-2,5

FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDM - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

De acordo com a tabela o melhor desempenho foi obtido pelo método de cubagem que utiliza a suta e o procedimento analítico de cubagem rigorosa. O pior resultado foi encontrado para o método que utiliza como instrumento de medição a fita métrica e o método de *Huber* para obtenção do volume.

Dentre os métodos que utilizam o *laser scanner* para prover dados à modelagem os melhores resultados para a variável volume foram alcançados pelos FDm e FPI, seguidos dos filtros FSt e FMo. O FMa apresentou desvios próximos ao método de cubagem de *Huber* utilizando a fita métrica.

A modelagem do volume é alcançada nas 12 árvores para as três primeiras toras. É possível constatar que até a sétima tora, dez árvores são passíveis de modelagem tridimensional. Foi possível modelar toras posicionadas a nove metros em apenas seis árvores. Estes resultados confirmam a possibilidade de modelagem do tronco em aproximadamente 65% da altura total da árvore e o déficit de dados *laser* do tronco na parte superior da copa.

Silva (2011) analisou os volumes das três primeiras toras para este mesmo conjunto de dados. Utilizando diferentes metodologias de processamento de dados *laser* para obtenção de áreas transversais e aplicando os resultados em fórmulas de

cubagem indicou o método de *Huber* para a cubagem de árvores. Para a primeira tora o erro médio em volume foi de -1%; para a segunda tora o erro foi de -9% e para a terceira tora o erro foi de -6%.

De acordo com estes resultados, a modelagem tridimensional do volume apresentou resultados mais próximos do valor paramétrico quando comparado com a aplicação de dados *laser* empregando a fórmula de *Huber* para segunda e terceira tora. O erro médio encontrado para a primeira tora, apesar de menor, esteve próximo ao desvio relativo encontrado para o modelo tridimensional. Estes resultados apontam que a rede triangular irregular é um método promissor para obtenção da variável volume de árvores.

O comportamento dos melhores métodos de obtenção do volume em relação ao valor paramétrico obtido com uso do Xilômetro o perfil de cada árvore estudada é apresentado nas figuras 51, 52, 53 Uma seta tracejada no gráfico do perfil indica o início da copa (galhos e acículas).

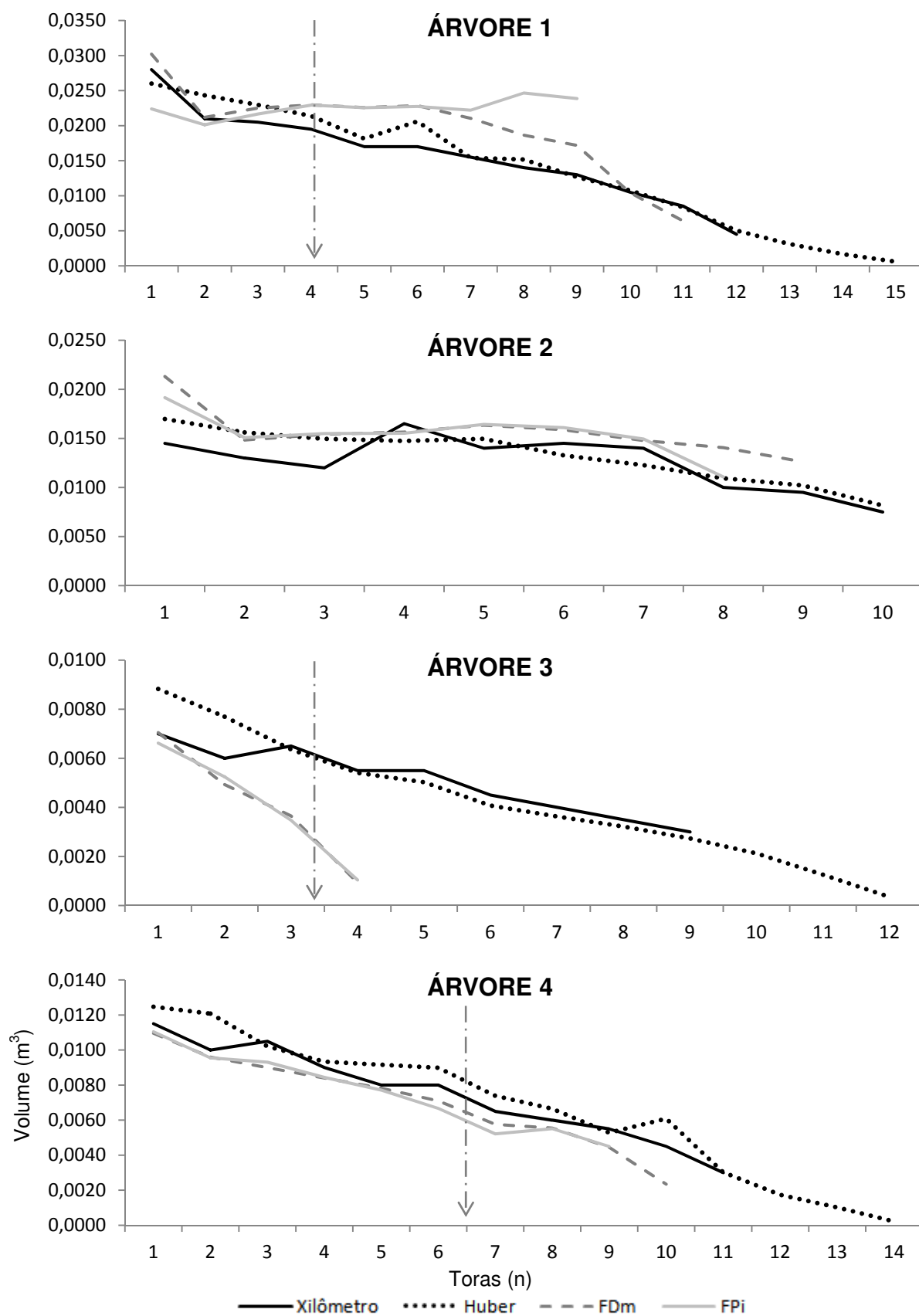


FIGURA 51 - PERFIL DA ÁRVORE REPRESENTADO PELOS MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO VOLUME (ÁRVORES 1 a 4)
 FONTE: O Autor (2012)

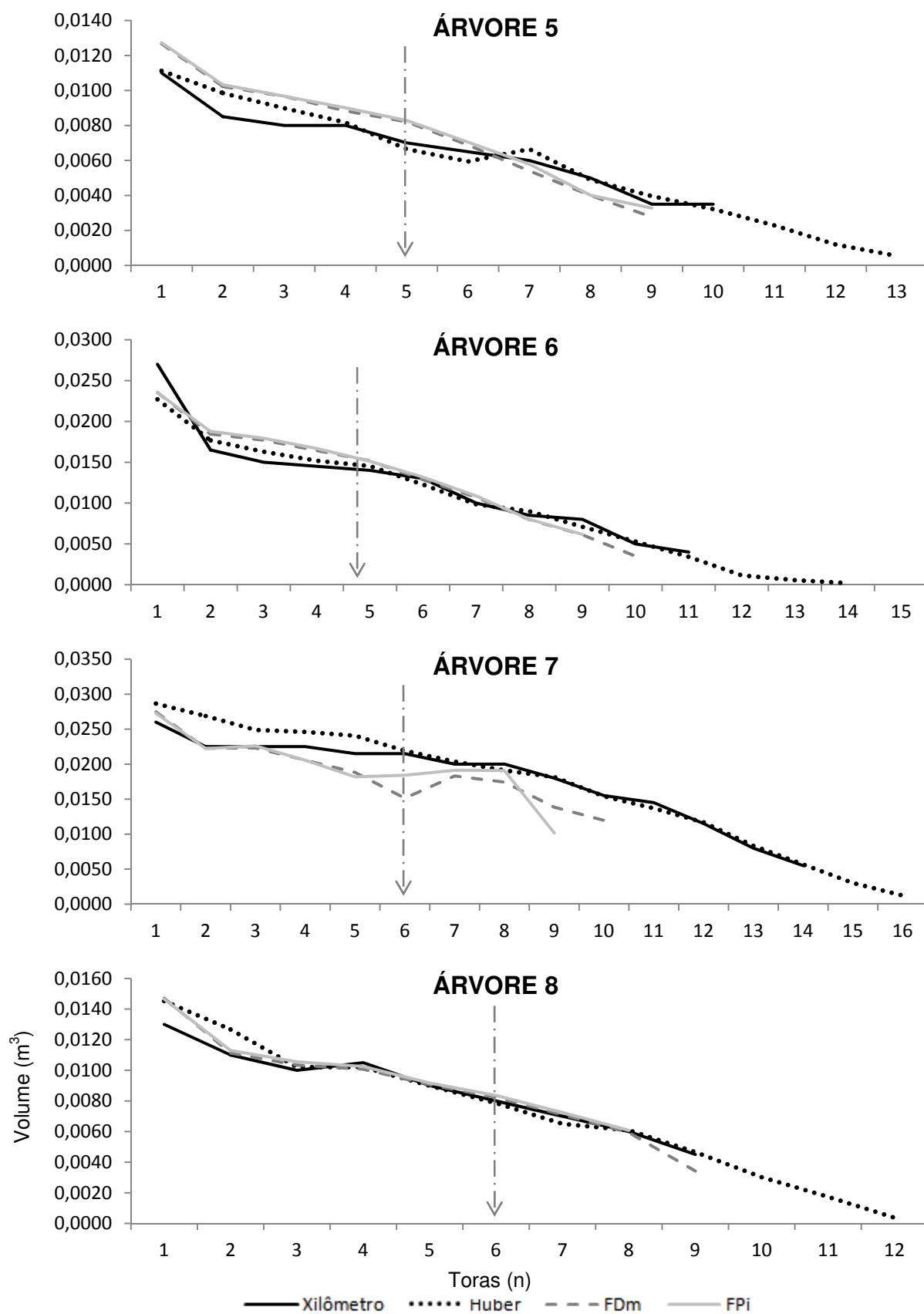


FIGURA 52 - PERFIL DA ÁRVORE REPRESENTADO PELOS MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO VOLUME (ÁRVORES 5 a 8)
 FONTE: O Autor (2012)

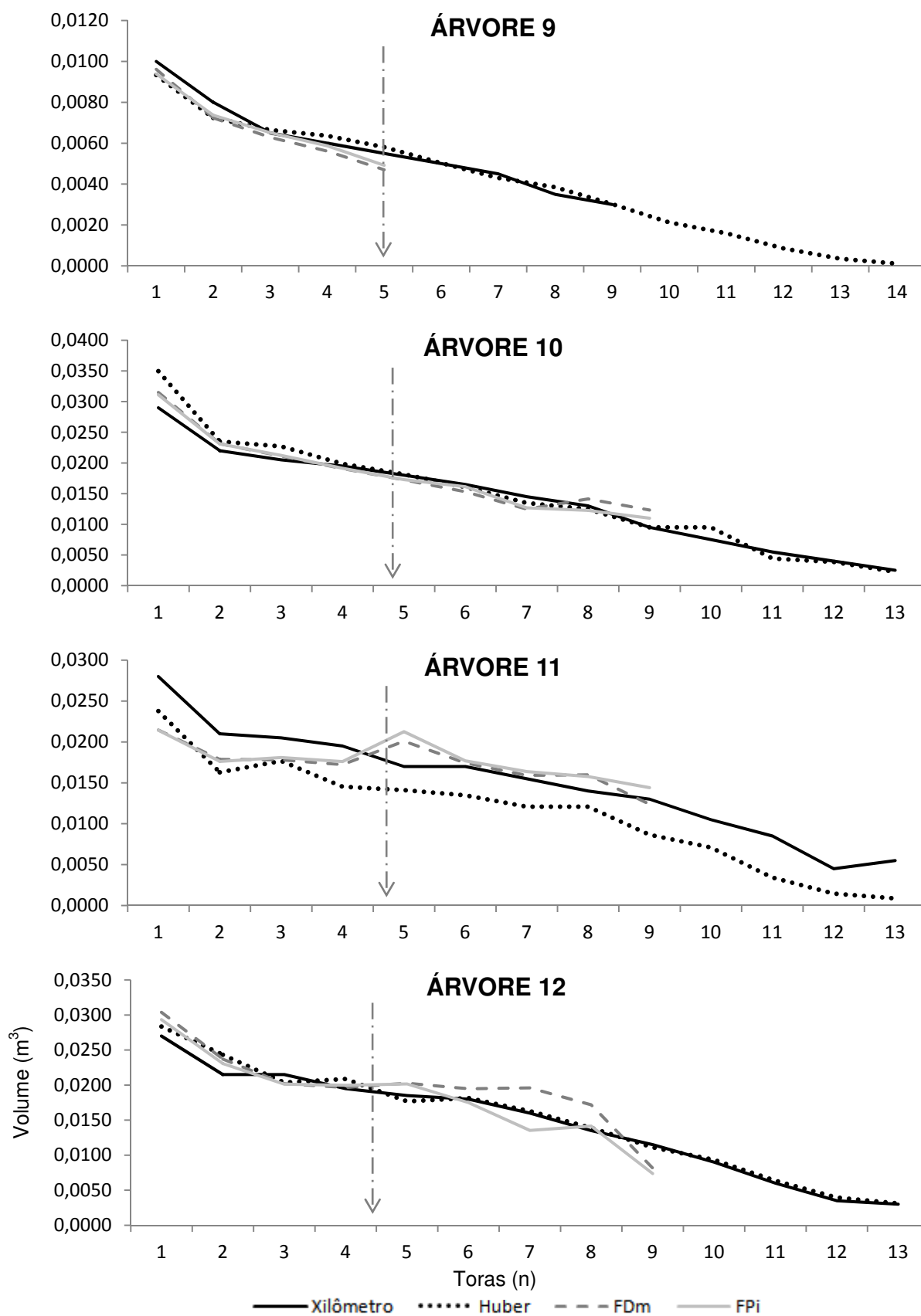


FIGURA 53 - PERFIL DA ÁRVORE REPRESENTADO PELOS MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO VOLUME (ÁRVORES 9 a 12)
 FONTE: O Autor (2012)

Ao observar os gráficos do perfil da árvore é possível distinguir que o método de *Huber* apresentou tendência a superestimar o volume, enquanto a modelagem tridimensional aplicada na nuvem de pontos dos métodos de filtragem Distância Máxima e Pontos Indexados não apresentou uma tendência, oscilando seu comportamento quanto à subestimação ou superestimação do volume.

O início da copa não influenciou os resultados do volume para a tora em que se encontrava, salvo para as árvores um (FIGURA 51), sete (FIGURA 52) e 11 (FIGURA 53). Este resultado permite afirmar que a influência da copa para a obtenção da variável volume é menor do que para a variável diâmetro.

A árvore três apresenta valores discrepantes para o volume das três primeiras toras modeladas tridimensionalmente. Este resultado permite constatar que apesar da nuvem de pontos apresentar a forma de um tronco, a disposição dos dados está descaracterizada pela influência do vento, ocasionando problemas para determinação do volume.

O volume das toras de cada árvore apresentada nos gráficos do perfil do tronco é apresentado na TABELA 5.

TABELA 5 - SOMATÓRIO DE VOLUME DAS TORAS PARA CADA ÁRVORE

Árvore	Toras (nº)	VOLUME (m ³)	ERRO RELATIVO AO VOLUME DO XILOMETRO (%)						
		Xilômetro	Huber (F)	Huber (S)	FMa	FSt	FMo	FDm	FPI
1	9	0,1655	-12,2	-6,8	-16,4	-23,5	-24,4	-20,3	-22,8
2	8	0,1085	-13,2	-4,8	-16,3	-19,9	-20,2	-18,2	-14,1
3	3	0,0195	-26,2	-17,4	0,9	-0,3	4,4	19,9	21,3
4	9	0,0750	-17,8	-8,7	-3,6	1,6	2,9	8,5	9,4
5	9	0,0635	-11,2	-4,3	-8,2	-11,2	-10,0	-8,1	-10,5
6	9	0,1265	-6,9	1,5	-4,8	-2,5	-3,0	-1,9	-3,0
7	9	0,1945	-13,4	-7,2	-11,1	4,5	3,3	9,4	8,6
8	8	0,0745	-11,8	-3,4	-10,1	-4,6	-4,1	-2,8	-4,1
9	5	0,0360	-4,2	1,7	-3,8	1,7	4,0	7,1	5,4
10	8	0,1530	-9,8	-5,3	-3,5	-3,0	-2,6	-0,6	0,0
11	9	0,1655	12,5	19,8	-3,2	3,2	3,0	5,6	3,2
12	7	0,1420	-9,6	-2,8	-7,5	-9,1	-9,7	-7,9	-1,2

FONTE: O Autor (2012)

* FMa - Filtro Manual; FSt - Filtro Seções Transversais; FMo - Filtro Seções Transversais Modificado; FDm - Filtro Distância máxima; FPI - Filtro Pontos Indexados.

De acordo com a tabela é possível destacar a proximidade encontrada para a variável volume utilizando a modelagem tridimensional aplicada aos métodos de filtragem. Apesar de alguns valores destoarem quanto ao volume de modelagem de dados *laser*, cabe destacar que a cubagem rigorosa não conseguiu chegar tão próximo ao valor paramétrico como a modelagem tridimensional.

4.2.3 Inferência estatística

Os resultados encontrados para variável dendrométrica volume foram submetidos à análise estatística para que fosse possível inferir sobre as diferenças encontradas para cada método de filtragem submetido à modelagem.

A aplicação do teste "F" na análise de variância não apresentou diferença estatística significativa para os tratamentos dentro dos blocos, porém, quando comparado as médias dos tratamentos entre os blocos, o valor da estatística "F" apresentou significância em todas as porções de toras analisadas (QUADRO 13).

TORA	TRATAMENTOS x BLOCOS	BLOCOS
1	NS	*
2	NS	*
3	NS	*
4	NS	*
5	NS	*
6	NS	*
7	NS	*
8	NS	*
9	NS	*

QUADRO 13 - RESULTADO DA APLICAÇÃO DO TESTE F NA ANÁLISE DE VARIÂNCIA. NS - NÃO SIGNIFICATIVO; * SIGNIFICATIVO A 95%.
FONTE: O Autor (2012)

A diferença estatística a 95% de probabilidade apontada entre blocos ressalta a importância da divisão das árvores em dois grupos de classes diamétricas.

Verificada a ausência de diferença estatística significativa dentro dos blocos, não é necessário a aplicação do teste de médias. Porém, com a facilidade computacional, este teste foi realizado e novamente não foram encontradas diferenças estatísticas significativas aplicando o teste de *Tukey* para a média da variável volume, evidenciando o fato de que as diferenças encontradas não são estatisticamente representadas.

4.3 *Software Dendrolaser v2.0*

O final deste trabalho é marcado pela compilação das rotinas de filtragem no programa *DENDROLASER*, *software* desenvolvido para o processamento de dados *laser scanner* terrestre aplicados a mensuração florestal.

A primeira versão do programa comportava o processamento de dados *laser* para obtenção das variáveis dendrométricas: altura total, diâmetros, áreas transversais e volumes, com base nos algoritmos apresentados por Silva (2011) e o enfoque desta versão era o trabalho com a nuvem de pontos previamente filtrada.

Para aprimorar o processamento de dados e automatizar a etapa de filtragem, necessária à obtenção de variáveis dendrométricas, as rotinas apresentadas neste trabalho foram incorporadas ao programa, que passa agora se chamar *DENDROLASER v2.0*.

O *DENDROLASER v2.0* tem como principal vantagem a automatização da filtragem, este procedimento traz como benefícios a obtenção de variáveis dendrométricas sem a interferência de pontos dispersos na nuvem de pontos que representa o tronco da árvore e a redução do tempo para a preparação dos dados via filtragem semi-automática.

Este *software* fica disponível no laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Paraná - UFPR. A interface de entrada no *DENDROLASER v2.0* bem como os créditos aos desenvolvedores e o endereço eletrônico para contato podem ser verificados na FIGURA 54.



FIGURA 54 - TELA DE ENTRADA DO SOFTWARE DENDROLASER
FONTE: O Autor (2012)

5 CONCLUSÕES

A coleta de dados e a programação computacional podem ser considerados pontos críticos no planejamento e execução de projetos que utilizam dados de medição *laser* para extrair informação de forma automática em ambiente florestal. As intempéries chuva e vento podem ser apontados como fatores limitantes na tomada de dados *laser* terrestre.

As hipóteses levantadas neste trabalho foram atestadas, mas limitações de ordem técnica podem ser distinguidas.

A primeira hipótese, de que a aplicação da filtragem na nuvem de pontos *laser* de uma árvore resulta em dados adequados à modelagem tridimensional do tronco foi comprovada, porém é constatado o problema da ausência de pontos que representam o tronco nas partes superiores da copa. A densa camada de acículas, que impede a chegada do pulso *laser* até o tronco, é apontada como a razão deste problema.

A segunda hipótese, que versa a respeito dos dados disponibilizados pela aplicação de diferentes metodologias para filtragem não diferirem significativamente quando submetidos à modelagem tridimensional para obtenção do volume do tronco, também foi comprovada. Todos os métodos aqui estudados não apresentaram diferença significativa para a variável volume.

A viabilidade da utilização das rotinas desenvolvidas para a filtragem dos dados *laser scanner* terrestre foi atestada por meio de análise quali-quantitativa. O exame visual detalhado dos dados laser permitiu a identificação de problemas que influenciaram diretamente nos resultados. Desta forma, é importante o posicionamento correto do equipamento em campo.

Os resultados indicam o Filtro Distância Máxima como o mais flexível para realização da filtragem com objetivo de se obter a superfície do tronco e dados aptos à modelagem tridimensional.

Se considerada a divisão do tronco, os métodos de filtragem alternaram posições no *ranking*. A base do tronco foi melhor representada pela nuvem de pontos produzida pelo Filtro Seções Transversais; para o intervalo base a 50 e 75% da altura total da árvore o melhor resultado foi alcançado pelo Filtro Distância

Máxima, e como diferencial, a ponta da árvore teve a Filtragem Manual como melhor método.

A aplicação do *laser* no levantamento de volume de árvores por meio da modelagem tridimensional apresentou resultados promissores devido a proximidade com o valor paramétrico obtido pelo método de deslocamento de água.

Os resultados obtidos pelo modelos tridimensionais foram inferiores quando comparados com a cubagem rigorosa pelo procedimento analítico de *Huber* utilizando a suta, porém quando utilizada a fita métrica estes resultados apresentaram-se mais adequados.

Dentre os métodos que utilizam o *laser scanner* para prover dados a modelagem, os melhores resultados foram alcançados pelos filtros Distância Máxima e Pontos Indexados, seguidos dos filtros Seções Transversais e Seções Transversais Modificado. Os dados disponibilizados à modelagem tridimensional pelo Filtro Manual estiveram próximos ao do método de cubagem de *Huber* utilizando a fita métrica.

A repetição de pontos nos métodos de filtragem não ocasionou irregularidade na representação da forma do tronco bem como não afetou os resultados para a variável volume significativamente. É possível dizer que a quantidade de pontos não precisa ser elevada para que se tenha modelo tridimensional do tronco acurado.

Os algoritmos que compõe as rotinas de filtragem são eficientes para o isolamento do tronco de árvores do gênero *Pinus* spp. Para que sejam atestados e recomendados como processamento padrão de filtragem é necessário a realização de testes que avaliem o comportamento dos métodos em diferentes espécies.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos de pesquisa envolvendo a tecnologia *laser* para mensuração de árvores deparam-se com inúmeros desafios a serem superados, problemas de ordem técnica e econômica.

Este trabalho, que tratou do levantamento de árvores isoladas em campo, deparou-se com inúmeras dúvidas que ainda precisam ser respondidas tais como: a resolução apropriada para o levantamento de dados, o número de estações *laser* por árvore, e o tratamento da ausência dos dados do tronco na parte superior da copa da árvore.

Para a realização do inventário florestal utilizando a tecnologia *laser scanner*, trabalhos de pesquisa abordando o processamento da nuvem de pontos para o conjunto de árvores amostradas, a logística de campo, tipo de parcela, intensidade amostral e custos do inventário são imprescindíveis.

A implementação de procedimentos confiáveis para identificação de árvores, determinação do início do tronco e separação do terreno bem como o aprimoramento das técnicas de modelagem tridimensional, precisam ser trabalhados para a eficiência do processamento de dados.

Dentre as recomendações aqui mencionadas, não poderia faltar a alusão ao aprimoramento do DENDROLASER. É um anseio dos desenvolvedores que novas versões sejam produzidas e que todas as rotinas sejam combinadas em um só *software*, tendo como resultado, no Brasil, o registro de um programa capaz de prover dados dendrométricos e processar o inventário florestal a partir de dados *laser scanner* terrestre.

Por fim, a viabilidade econômica de aplicação da tecnologia *laser* na medição de árvores só será alcançada com a concepção de instrumento específico para o levantamento florestal, o que torna imprescindível a aproximação entre pesquisadores e empresas de equipamentos *laser scanner* terrestre.

REFERÊNCIAS

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.

ASCHOFF, T.; THIES, M.; SPIECKER, H. Describing forest stands using terrestrial *laser-scanning*. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** v. 35, comm. 5, p. 237- 241, 2004.

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

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.

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

BIENERT, A., SCHELLER, S.; KEANE, E.; MOHAN, F.; NUGENT, C. 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.; 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, 2006a.

BIENERT, A., SCHELLER, S.; KEANE, E.; MULLOOLY, G. 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.

BROLLY, G., KIRÁLY G. Algorithms for stem mapping by means of Terrestrial *Laser Scanning*. **Acta Sylvatica et Lignaria Hungarica**, v5, p. 119-130, 2009.

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

DERPANIS, K.G. **Mean Shift Clustering**. 2005. Disponível em: www.cse.yorku.ca/~kosta/.../mean_shift.pdf. Acesso em: 25/10/2011

EDELSBRUNNER, H. **Geometry and Topology of Mesh Generation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 209 p. Disponível em: http://books.google.com.br/books?id=v6BybEYVGqYC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 25 / 10/ 2011.

FERREIRA, D.F. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**. Lavras, v.6, p. 36-41, 2008.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S do A.; CARNEIRO, M.R.A. Testing accuracy of log volume calculation procedures against water displacement techniques (xylometer). **Canadian Journal of Forest Research**, v.30, pp. 990-997, 2000.

FUKUNAGA, K.; HOSTETLER, L. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. **IEEE Transactions On Information Theory**, Curitiba, v. 21, n. 1, p.32-40, jan. 1975.

GATZIOLIS, D.; POPESCU, S.; SHERIDAN, R.; KU, N. Evaluation of terrestrial lidar technology for the development of local tree volume equations. In: **SILVILASER 10^o**. Freiburg. Proceedings... Freiburg, 2010. 1 CD-ROM.

SOLUTIONS, Gridpoint. **The HDS3000**. Disponível em: <http://www.gridpointsolutions.com/gpsltd2/hds3000.htm/>. Acesso em: 5 jul. 2011.

HENNING, J. G.; RADTKE, P. J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. **Forest Science**, v. 1, n. 52, p. 67-80, 2006.

HOPKINSON, L. CHASMER, L.; YOUNG-POW, C.; TREITZ, P. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. **Can. J. For. Res.**, v. 34, p. 573-583, 2004.

KIRÁLY, G.; BROLLY, G. Tree height estimation methods for terrestrial *laser* scanning in a forest reserve. **IAPRS**, v. 36, p. 211-215, 2007.

KIRÁLY, G.; BROLLY, G. Volume calculations of single trees based on terrestrial *laser* scanning. In: SILVILASER, 10^o, 2010, Freiburg. Proceedings... Freiburg, 2010. 1 CD-ROM.

KOEHLER, H. S. **Estatística Experimental**. 2. ed. Curitiba: UFPR, 1996. 124 p.

LALONDE, J. F.; VANDAPEL, N.; HEBERT, M. **Automatic three-dimensional point cloud processing for Forest inventory**. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2006.

LIANG, X.; LITKEY, P.; HYYPPA, J.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; HOLOPAINEN, M. Plot-level trunk detection and reconstruction using one scan mode terrestrial *laser* scanning data. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON EARTH OBSERVATION AND REMOTE SENSING APPLICATIONS, 2008, Beijing, 2008.

LICHTI, D. D.; STEWART, M.P.; TSAKIRI, M.; SNOW, A.J. Benchmark tests on a three-dimensional *laser* scanning system. **Geomat. Res. Aust**, v. 72, p. 1-23, 2000.

LINGNAU, C., MACHADO, A. M. L.; BAVARESCO JUNIOR, A.; COLLA, F. L. Determinação de diâmetros em diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados *laser* terrestre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...Natal: INPE 2009**. p. 5031 – 5038.

LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y.; DAMAS, B.; SANTOS, 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**.

LITKEY, P.; LIANG, X. HYYPPÄ, J.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; HOLOPAINEN, M. 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.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006.

MACHADO, S. do A.; NADOLNY, M.C. Comparação de métodos de cubagem de árvores e de diversos comprimentos de secção. In Congresso Florestal e do Meio Ambiente do Paraná, 3º. **Anais.....** Curitiba. Associação Paranaense de Engenheiros Florestais, Curitiba, pp. 89-104. 1991. V. 1

MÁRQUEZ, A. **Un tratado sobre el escaner terrestre TLS**. Caracas: Mecinca, 2010. Disponível em: <<http://www.mecinca.com/papers/EscanerTLS.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2011.

MARTINS NETO, R. P. ; BUCK, A. L. B ; SILVA, M.N. ; LINGNAU, C. ; MACHADO, A.M.L ; PESCK, V. A. . Comparação de variáveis dendrométricas obtidas pelos métodos tradicionais de campo e a varredura *laser* terrestre a diferentes distâncias da árvore. In: 5 Simpósio Latino-Americano sobre Manejo Florestal, 2011, Santa Maria. **Anais...2011**. v. 5. p. 410-417.

PEREIRA, A. R.; PEREIRA, R. G. Extração automática de árvores e áreas de secções transversais a partir de dados *laser* terrestre. Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação em Engenharia Cartográfica). Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Paraná, 2009.

PFEIFER, N.; GORTE, B.; WINTERHALDER, D.. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial *laser scanner* data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)**, v. 35, n. 5, part b, p. 114 – 119, 2004.

PFEIFER, N.; WINTERHALDER, D.. Modelling of tree cross sections from terrestrial *laser* scanning data with free-form curves. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8/w2. Freiburg, 2004.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. San José: Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura, 1997.

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.

SIMONSE, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H.; THIES, M. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial *Laserscanning*. **Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests**, Umeå/Sweden,. p. 251- 257, 2003.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: UFV, 2006. 276 p.

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.

VIEIRA, S. **Introdução a bioestatística**. Rio de Janeiro: Campus, 1991.

VIEIRA, S.; HOFFMANN, R. **Estatística experimental**. São Paulo: Atlas, 1989.

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**, p. 424 -429. Finland, 2007.

DOCUMENTOS CONSULTADOS

ELOFORTE - **Medidores de altura** - disponível em:
http://www.eloforte.com/v2/inventario-florestal/medidores-de-altura/hipsometro-vertex-iv/114/com_virtuemart/ Acesso em: 10/05/2011.

JELLEN, B.; SYRSTAD, T. **VBA e macros para Microsoft Office Excel 2007**. São Paulo: Pearson Prentice-hall, 2008. 420 p.

LEICA ACESSÓRIOS - **Tilt & Turn target**. Disponível em: http://hds.leica-geosystems.com/en/Targets_19143.htm/ Acesso em: 17/04/2011

LEICA SCANSTATION HDS3000 - **USER MANUAL (2006)**. Disponível em: http://www.gefos-leica.cz/ftp/HDS_Laser_sken/Navody/ScanStation_HDS3000_UM_en.pdf Acesso em: 22/07/2011.

MACHADO, A. M. L. **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR**. 201 p. Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 2006.

ET SPATIAL TECHNIQUES - **Triangulated Irregular Network**. Disponível em: http://www.ian-ko.com/resources/triangulated_irregular_network.htm/ Acesso em: 23/04/2011.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. Revista Symposium (Lavras), v. 6, p. 36-41, 2008.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In...45^a Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria. UFSCar, São Carlos, SP, Julho de 2000. p.255-258.