

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ LEONARDO BORTOLOTTO BUCK

MODELAGEM DE DADOS *LASER SCANNER* TERRESTRE PARA ESTIMATIVA
DO VOLUME EM PLANTIOS CLONAIIS DE *Eucalyptus* spp.

CURITIBA

2016

ANDRÉ LEONARDO BORTOLOTTO BUCK

MODELAGEM DE DADOS *LASER SCANNER* TERRESTRE PARA ESTIMATIVA
DO VOLUME EM PLANTIOS CLONAIIS DE *Eucalyptus* spp.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Christel Lingnau.
Coorientador: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado
Coorientador: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

CURITIBA

2016

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Buck, André Leonardo Bortolotto

Modelagem de dados *laser scanner* terrestre para estimativa do volume em plantios clonais de *Eucalyptus spp.* / André Leonardo Bortolotto Buck. – Curitiba, 2016.

145 f. : il.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Christel Lingnau

Coorientadores: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado

Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 11/03/2016.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Madeira – Medição. 2. Troncos (Botânica). 3. Eucalipto. 4. Manejo florestal. 5. Teses. I. Lingnau, Christel. II. Machado, Álvaro Muriel Lima. III. Péllico Netto, Sylvio. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.52

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **ANDRE LEONARDO BORTOLOTTO BUCK**, intitulada: "**MODELAGEM DE DADOS LASER SCANNER TERRESTRE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME EM PLANTIOS CLONAIS DE Eucalyptus spp.**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

Curitiba, 11 de Março de 2016.



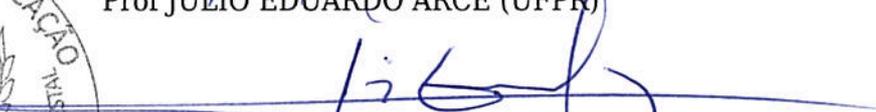
Prof CHRISTEL LINGNAU (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof AFONSO FIGUEIREDO FILHO (UFPR)



Prof JULIO EDUARDO ARCE (UFPR)



Prof LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ (USP)



Prof MARCOS BENEDITO SCHIMALSKI (UDESC)

BIOGRAFIA DO AUTOR

ANDRÉ LEONARDO BORTOLOTTO BUCK, filho de Adriane Terezinha Bortolotto Buck e Ailton Buck, nasceu em Curitiba no estado de Santa Catarina, no dia 10 de novembro de 1986. Iniciou seus estudos em Curitiba-SC no Colégio Maria Imaculada em 1991, onde cursou o Ensino Básico, concluindo-o em 2004.

No ano de 2005 ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina, no Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV/UDESC, na cidade de Lages-SC, período em que também realizou sua iniciação científica no laboratório de Geoprocessamento, tendo concluído o curso em 2009.

Em março de 2010 ingressou no mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manejo Florestal, com ênfase em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas, em Curitiba – PR, onde trabalhou com *laser* terrestre para mensuração de árvores individuais, concluindo-o em fevereiro de 2012. Ainda no ano de 2012 ingressou no doutorado dando continuidade aos seus estudos com *laser* terrestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Ingressou em 2014 no Curso Técnico de Agrimensura do Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, na modalidade certificação por competências, onde obteve o título de Técnico em Agrimensura em 2015.

A conclusão de seu Doutorado foi realizada em 2016 no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, onde apresentou a tese intitulada: “MODELAGEM DE DADOS LASER SCANNER TERRESTRE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME EM PLANTIOS CLONAIIS DE *Eucalyptus* spp”.

Aos meus queridos e amados pais:

Adriane e Ailton Buck.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pedi a ele que me colocasse no centro de sua vontade, e assim me foi concedido oportunidades tão valiosas.

Aos meus familiares, pessoas que estiveram prestando todo apoio, incentivo e compreensão, principalmente entendendo minha ausência neste período de tantos compromissos que, mesmo estando próximo de casa, as visitas foram poucas. Espero poder retomar esse tempo o mais rápido possível.

Pai e mãe, mais uma etapa concluída! É muito bom saber que posso contar com vocês para alcançar meus objetivos. Sem o amor, o carinho e as conversas que tivemos, certamente seria muito difícil ter chegado até aqui. Mais uma vez gostaria de expressar minha gratidão pelo apoio de vocês.

Não poderia deixar de registrar, em especial, meus agradecimentos à minha “tia irmã” Elizandra Bortolotto por mais uma vez ter me acolhido em sua casa, prestando todo apoio necessário para realização de meus estudos. Vou sentir muita saudade de nossas conversas e da convivência nesses últimos 6 anos.

Às pessoas que formam o programa de pós-graduação em Engenharia Florestal – UFPR, colegas, funcionários, professores, e agora meus amigos. Pessoas que estiveram dividindo comigo os momentos alegres e também os de aflição no período em que realizei o doutorado. Tenho certeza que hoje entendo um pouco mais de como é trabalhar com pesquisa graças a experiência que tive com vocês.

À professora Dra. Christel Lingnau pela orientação, troca de ideias, conversas e discussões para melhoria deste trabalho bem como pela confiança depositada em mim para chegarmos até aqui. Ao professor Dr. Álvaro Muriel Lima Machado pelo empenho em me ouvir, atender meus telefonemas e esclarecer muitas dúvidas para o aprimoramento de minha tese. Ao professor Dr. Sylvio Péllico Netto, aprendi muito com seus ensinamentos, considero uma oportunidade ímpar ter sido seu orientado, um grande amigo, entusiasta, incentivador, e mestre em fazer pesquisa.

Aos amigos que fiz na Universidade Federal do Paraná e que considero pessoas de grande importância em minha formação pessoal e profissional. Em especial aos amigos Matheus Nunes Silva, por juntos termos iniciado as pesquisas com *laser* terrestre e estendido esse trabalho à uma parceria profissional; Rorai Pereira Martins Neto pelos telefonemas para troca de ideias e incentivos mesmo

quando tudo parecia não estar indo muito bem; Vagner Alex Pesck pelas horas dedicadas na coleta de dados e discussão de resultados; aos amigos Dr. Maurício Koubay do Amaral, Raphael, Murilo e Israel pela ajuda nos processamentos e por estarem no laboratório de geoprocessamento da UFPR para troca de ideias que permitiam iniciarmos discussões interessantes quanto a continuidade da linha de pesquisa.

À Universidade do Estado de Santa Catarina – CAV/UDESC, instituição que me proporcionou a graduação e que me acolheu mais uma vez durante a pós-graduação. Em especial ao Professor Dr. Silvio Luís Rafaeli Neto, pelos conselhos, incentivos, amizade e orientação desde minha iniciação científica. Ao Professor Msc. Leonardo Josué Biffi, sempre disposto para debater ideias, tirar dúvidas e trocar conhecimentos, um grande amigo.

À empresa Eldorado do Brasil pelo apoio ao projeto de pesquisa, disponibilização das áreas e equipe para auxílio na coleta de dados. A Santiago & Cintra pela disponibilização do equipamento Trimble TX5 e suporte técnico à coleta de dados realizada em campo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida nos meses finais deste estudo para concretização do Doutorado no programa de pós-graduação em Engenharia Florestal - UFPR.

ABSTRACT

This study sought to find the volume of individual trees in clonal stands of *Eucalyptus* spp. using models derived from terrestrial laser scanning data. The study area is located in the municipality of Três Lagoas, MS, Brazil. Clonal stands consist of 2-years-old *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla*, and also 4- and 5-years-old *Eucalyptus urograndis*. Single and multiple terrestrial laser scan data was collected, as well as conventional methods from twelve circular plots with 400 m². Results were validated using 103 felled trees. Scanned point clouds were registered and demarcated by plot. The algorithm Tree Detection in Plantation used here was developed and proposed for semi-automatic detection of trees based on stand row alignment. Detected trees were subject to a filtering process and stem volume modeled by two methods: I) Triangular Irregular Network (TIN); and II) adjustment of circumferences (AC). Modeling by regression was applied at the apex of the tree, where the trunk could not be modeled. The Schöpfer and Hradetzki polynomial models fitted to the diametric series derived from conventional measurements and those extracted from terrestrial lidar scanning. The results showed that the using multiple stations reduces the shadowing effect of scanning in the circular plots. The tree detection method used in combination with visual examination of the point clouds resulted in identification of 100% of trees. The average height reached in filtering over the full height was approximately 29%, 53%, and 69% for two-, four-, and five-years-old trees, respectively. The three-dimensional volume of the stem resulted in underestimation up to 32% of the first logs compared to the Smalian method (diameters measured with calipers). Using the Friedman test ($\alpha = 5\%$) the volume estimation methods were statistically different, whereby the TIN model presented the lowest volume estimates. Total height and DBH were similar to conventional measurement data ($R^2 = 0.98$) for 5-years-old stands. The stem profile was best expressed by the polynomial model with integer and fractional powers when the database consisted of diameter measurements. For the LIDAR data, the polynomial model with integer and fractional powers best represented stem profile of four-years-old tree while a fifth degree polynomial model described five-years-old stands best. The models did not adequately represent the stem profile of two-years-old trees. Validation of the fitted models resulted in mean errors in the estimates between 6.28% and 8.45% for the diameter series in 4-years-old and 5-years-old stands, respectively, and 13.81% and 14.86% error for the volume, respectively. Surveying by terrestrial laser scanning in forests will be subject to the effects of occlusion, shadowing, and the displacement of the tree axis by wind during data collection. These are effects that limiting the use of the terrestrial lidar and should be solved by improving cloud point processing techniques.

Keywords: terrestrial laser scanning, tree detection, three-dimensional modeling, stem taper.

LISTAS ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA DO TRABALHO	24
FIGURA 2 – PARCELA INSTALADA EM PLANTIO DE <i>EUCALYPTUS</i> spp. EM DIFERENTES IDADES: (A) <i>Eucalyptus grandis</i> AOS 2 ANOS; (B) <i>Eucalyptus urophylla</i> AOS 2 ANOS; (C) <i>Eucalyptus urograndis</i> AOS 4 ANOS; (D) <i>Eucalyptus urograndis</i> AOS 5 ANOS.....	26
FIGURA 3 – DEMARCAÇÃO DE ÁRVORES NA PARCELA INSTALADA EM CAMPO.	27
FIGURA 4 – TRIMBLE TX5: (A) EQUIPAMENTO INSTALADO SOBRE O TRIPÉ; (B) CAMPO DE VISADA VERTICAL E HORIZONTAL – FOV	28
FIGURA 5 – LEVANTAMENTO POR VARREDURA <i>LASER</i> TERRESTRE EM UMA PARCELA: A) <i>LASER</i> TERRESTRE; B) ALVOS ESFÉRICOS.....	29
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DO LEVANTAMENTO POR TLS EM PARCELA CIRCULAR EM POVOAMENTOS CLONAIIS DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	30
FIGURA 7 – MEDIÇÃO DA ALTURA TOTAL E DE DIÂMETROS AO LONGO DO TRONCO.....	33
FIGURA 8 – DETECÇÃO DE ESFERAS: (A) ESFERA DETECTADA CORRETAMENTE PELO ALGORITMO; (B) ESFERA DETECTADA ERRONEAMENTE SENDO NECESSÁRIA SUA EXCLUSÃO PARA O REGISTRO.	36
FIGURA 9 – ALGORITMO DE RECORTE	37
FIGURA 10 – DELIMITAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DA PARCELA: PARCELA 9 (2 ANOS).....	38
FIGURA 11 – EXTRAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA NUVEM DE PONTOS DA PARCELA.....	45
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DO ALGORITMO DE SEGMENTAÇÃO APLICADO À UMA SEÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DE UMA PARCELA	46
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO DO ALGORITMO <i>TREE DETECTION IN PLANTATION</i>	47
FIGURA 14 – PROJEÇÃO DAS DISTÂNCIAS E DOS AZIMUTES DE UM ALINHAMENTO ENTRE TRÊS PONTOS.....	49

FIGURA 15 – CLASSIFICAÇÃO DO ALINHAMENTO DE ACORDO COM AS DIREÇÕES E QUADRANTES	51
FIGURA 16 – RAIOS DE BUSCA E VETORES DE MÉDIAS.....	52
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DOS VETORES DE MÉDIAS EM UM SISTEMA DE COORDENADAS PLANAS PARA $n \geq 3$	54
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DOS VETORES DE MÉDIAS EM UM SISTEMA DE COORDENADAS PLANAS PARA $n=2$	55
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO DO VETOR DE MÉDIAS EM UM SISTEMA DE COORDENADAS PLANAS PARA $n=1$	56
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁRVORES EM NUVENS DE PONTOS DE PARCELAS CIRCULARES (400 m ²).....	58
FIGURA 21 – EFEITO DO SOMBREAMENTO NA VARREDURA SIMPLES DO POVOAMENTO DE 5 ANOS: (A) VISTA FRONTAL; (B) VISTA DE TOPO.....	59
FIGURA 22 – PROJEÇÃO DAS COORDENADAS XY DOS VETORES DE MÉDIAS EM PARCELA CIRCULAR LEVANTADA POR TLS: PARCELA 1.....	60
FIGURA 23 – PROJEÇÃO DA COORDENADA Z DOS VETORES DE MÉDIAS EM PARCELA CIRCULAR LEVANTADA POR TLS: PARCELA 1.....	60
FIGURA 24 – SUBCONJUNTOS DE NUVENS DE PONTOS GERADOS PELO PROCESSO DE SEGMENTAÇÃO.....	61
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO DAS COORDENADAS XY DOS VETORES DE MÉDIAS SELECIONADOS A PARTIR DO LIMAR ESTABELECIDO PARA COORDENADA Z: PARCELA 1.....	62
FIGURA 26 – REPRESENTAÇÃO DA COORDENADA Z DOS VETORES DE MÉDIAS SELECIONADOS A PARTIR DO LIMAR ESTABELECIDO PARA COORDENADA Z: PARCELA 1.....	62
FIGURA 27 – PROJEÇÃO DAS COORDENADAS XY DOS VETORES DE MÉDIA CLASSIFICADOS PELO ALGORITMO TDP: PARCELA 03.....	64
FIGURA 28 – ERRO TIPO II - OBJETO DETECTADOS COMO TRONCO: (A) VISTA DE TOPO (B) VISTA EM PERSPECTIVA.....	64
FIGURA 29 – PROJEÇÃO DAS COORDENADAS XY DOS VETORES DE MÉDIA CLASSIFICADOS PELO ALGORITMO TDP: PARCELA 12.....	65
FIGURA 30 – PROJEÇÃO DAS COORDENADAS XY DOS VETORES DE MÉDIA CLASSIFICADOS PELO ALGORITMO TDP: PARCELA 7.....	66
FIGURA 31 – DIAGRAMA DO ALGORITMO FILTRO DISTÂNCIA MÁXIMA	77

FIGURA 32 – REPRESENTAÇÃO DA MODELAGEM DO TRONCO EM TORAS DE 2 METROS: MEDIDAS DE CAMPO; REDE TRIANGULAR IRREGULAR (TIN); AJUSTE DE CIRCUNFERÊNCIAS.....	79
FIGURA 33 – REDE TRIANGULAR IRREGULAR.....	80
FIGURA 34 – ALTURA MÉDIA DAS ÁRVORES POR CLASSE DE IDADE EM RELAÇÃO À ALTURA COMERCIAL E ALTURA DE FILTRAGEM DO TRONCO....	85
FIGURA 35 – ÁRVORE DE UMA PARCELA CIRCULAR LEVANTADA POR TRÊS ESTAÇÕES DE TLS AOS DOIS ANOS DE IDADE.....	86
FIGURA 36 – EFEITO DO VENTO EM ÁRVORE DE UMA PARCELA CIRCULAR LEVANTADA POR CINCO ESTAÇÕES DE TLS AOS 5 ANOS DE IDADE	88
FIGURA 37 – RESÍDUO ENCONTRADO NA DETERMINAÇÃO DA COTA DE MEDIÇÃO DO DAP.....	88
FIGURA 38 – EFEITO DE SOMBREAMENTO PELO SUB-BOSQUE NO LEVANTAMENTO DE DADOS – AUSÊNCIA DE PONTOS NA BASE DE ÁRVORE	89
FIGURA 39 – COMPARAÇÃO DA ALTURA TOTAL MEDIDA EM CAMPO E A ALTURA DETERMINADA PELA DIFERENÇA ENTRE AS COTAS OBTIDAS DE FORMA AUTOMÁTICA: A) VALIDAÇÃO CRUZADA; B) DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS SOBRE O DAP.....	90
FIGURA 40 – DETERMINAÇÃO DE ALTURAS PELO MÉTODO AUTOMÁTICO: SUPERESTIMATIVA DE ALTURA DEVIDO A PONTOS DA COPA DE ÁRVORES ADJACENTES DOMINANTES.....	91
FIGURA 41 – COMPARAÇÃO DA ALTURA TOTAL MEDIDA EM CAMPO E A ALTURA DETERMINADA PELA DIFERENÇA ENTRE AS COTAS OBTIDAS DE FORMA SEMIAUTOMÁTICA: A) VALIDAÇÃO CRUZADA; B) DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS SOBRE O DAP.....	92
FIGURA 42 – DETERMINAÇÃO DE ALTURAS PELO MÉTODO SEMIAUTOMÁTICO: SUBESTIMAÇÃO DA ALTURA PELA AUSÊNCIA DE PONTOS DO ÁPICE DA COPA	93
FIGURA 43 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS DE CUBAGEM PARA ÁRVORES DE 2 ANOS: (A) VOLUME DE TORAS; (B) MÉDIA PERCENTUAL DO RESÍDUO EM RELAÇÃO A CUBAGEM CONVENCIONAL PELO MÉTODO DE SMALIAN (SUTA).....	94

FIGURA 44 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS DE CUBAGEM PARA ÁRVORES DE 4 ANOS: (A) VOLUME DE TORAS; (B) MÉDIA PERCENTUAL DO RESÍDUO EM RELAÇÃO A CUBAGEM CONVENCIONAL PELO MÉTODO DE SMALIAN (SUTA).....	95
FIGURA 45 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS DE CUBAGEM PARA ÁRVORES DE 5 ANOS: (A) VOLUME DE TORAS; (B) MÉDIA PERCENTUAL DO RESÍDUO EM RELAÇÃO A CUBAGEM CONVENCIONAL PELO MÉTODO DE SMALIAN (SUTA).....	96
FIGURA 46 – DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS SOBRE A ALTURA RELATIVA.....	98
FIGURA 47 – DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS SOBRE O DAP	99
FIGURA 48 – DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS SOBRE A POSIÇÃO DA TORA NO TRONCO.....	100
FIGURA 49 – REPRESENTAÇÃO DO AJUSTE DE UMA CIRCUNFERÊNCIA EM UMA SEÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DO TRONCO	116
FIGURA 50 – COMPARAÇÃO DA ALTURA TOTAL MEDIDA EM CAMPO E A ALTURA DETERMINADA PELA DIFERENÇA ENTRE AS COTAS OBTIDAS DE FORMA SEMIAUTOMÁTICA – (A) AJUSTE LINEAR; (B) DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS.....	122
FIGURA 51 – COMPARAÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO MEDIDO EM CAMPO E O DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO OBTIDO PELO AJUSTE DE CIRCUNFERÊNCIA AOS DADOS LASER: A) VALIDAÇÃO CRUZADA; B) DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS.	124
FIGURA 52 – PERFIL DO TRONCO GERADO A PARTIR DE SÉRIES DIAMÉTRICAS: (A) MÉTRICAS <i>LASER</i> ; (B) DADOS DE CUBAGEM.	126
FIGURA 53 – DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS PARA O DIÂMETRO EM DIFERENTES ALTURAS AO LONGO DO TRONCO DAS ÁRVORES	127
FIGURA 54 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS DE AFILAMENTO AJUSTADOS A PARTIR DE DADOS DE CUBAGEM.....	130
FIGURA 55 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS DE AFILAMENTO AJUSTADOS A PARTIR DE MÉTRICAS <i>LASER</i>	132
FIGURA 56 – MODELOS AJUSTADOS PARA EXPRESSAR O PERFIL DO TRONCO DE <i>Eucalyptus</i> spp. EM DIFERENTES IDADES.....	134
FIGURA 57 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA ESTIMATIVA DE DIÂMETROS EM DIFERENTES ALTURAS (<i>di</i>).....	136

FIGURA 58 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA ESTIMATIVA DE VOLUMES
EM SEÇÕES ABSOLUTAS AO LONGO DO TRONCO (*vi*). 138

LISTAS DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE.....	28
TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS PARCELAS LEVANTADAS EM CAMPO: DAP COM CASCA.....	31
TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO DAS PARCELAS LEVANTADAS EM CAMPO: ALTURA TOTAL.....	32
TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DAS ÁRVORES CUBADAS EM CAMPO: DAP COM CASCA.....	34
TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO DAS ÁRVORES CUBADAS EM CAMPO: ALTURA TOTAL.....	34
TABELA 6 – CARACTERIZAÇÃO DAS ÁRVORES CUBADAS EM CAMPO: VOLUME COM CASCA.....	34
TABELA 7 – VERIFICAÇÃO DO QUADRANTE E CÁLCULO DOS AZIMUTES.....	50
TABELA 8 – NÚMERO DE ÁRVORES EM CAMPO E EM NUVEM DE PONTOS DE TLS.....	57
TABELA 9 – RESULTADOS DA DETECÇÃO DE ÁRVORES NA VARREDURA SIMPLES (VS).....	63
TABELA 10 – RESULTADOS DA DETECÇÃO DE ÁRVORES NA VARREDURA MÚLTIPLA (VM).....	63
TABELA 11 – MÉTRICAS TLS NO PROCESSAMENTO DE NUVEM DE PONTOS DE ÁRVORES.....	75
TABELA 12 – PÂRAMETROS DE ENTRADA PARA O PROCEDIMENTO DE FILTRAGEM.....	77
TABELA 13 – FÓRMULAS USADAS PARA OBTENÇÃO DOS VOLUMES.....	82
TABELA 14 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS TESTES DE FRIEDMAN E DE COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS PARA OS VOLUMES OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS.....	102
TABELA 15 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DO MODELO POLINOMIAL DE QUINTO GRAU AJUSTADO COM DADOS DE CUBAGEM PARA ESTIMAR O DIÂMETRO COM CASCA (<i>di</i>).....	128

TABELA 16 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS PARA O MODELO POLINOMIAL DE POTÊNCIAS INTEIRAS E FRACIONÁRIAS AJUSTADO COM DADOS DE CUBAGEM PARA ESTIMAR O DIÂMETRO COM CASCA (d_i).....	129
TABELA 17 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS PARA O MODELO POLINOMIAL DE QUINTO GRAU AJUSTADO COM MÉTRICAS LASER PARA ESTIMAR O DIÂMETRO COM CASCA (d_i)	131
TABELA 18 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS PARA O MODELO POLINOMIAL DE POTÊNCIAS INTEIRAS E FRACIONÁRIAS AJUSTADO COM MÉTRICAS LASER PARA ESTIMAR O DIÂMETRO COM CASCA (d_i).....	131
TABELA 19 – VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA OBTENÇÃO DE DIÂMETROS COM CASCA EM DIFERENTES ALTURAS (d_i)	135
TABELA 20 – VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA OBTENÇÃO DE VOLUMES EM SEÇÕES ABSOLUTAS AO LONGO DO TRONCO (v_i).....	137

SUMÁRIO

1 ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA	20
1.1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1.1 Formulação do problema.....	22
1.1.2 Hipóteses.....	22
1.1.3 Objetivo geral.....	23
1.1.4 Objetivos específicos.....	23
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS	24
1.2.1 Área de estudo	25
1.2.2 Coleta de dados.....	27
1.2.3 Pré-processamento	35
REFERÊNCIAS	39
2 DETECÇÃO DE ÁRVORES EM NUVENS DE PONTOS DE VARREDURA LASER TERRESTRE.....	40
2.1 INTRODUÇÃO.....	42
2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	43
2.3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
2.3.1 Recorte de uma seção transversal da nuvem de pontos.....	44
2.3.2 Segmentação por componentes conectadas.....	46
2.3.3 Aplicação do algoritmo <i>Tree Detection in Plantation</i> (TDP).....	47
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
2.4.1 Validação do número de árvores interpretadas visualmente em varreduras simples e múltiplas.....	57
2.4.2 Segmentação da nuvem de pontos	60
2.4.3 Detecção de árvores.....	61
2.5 CONCLUSÕES.....	67

REFERÊNCIAS	68
3 MODELAGEM DO VOLUME DO TRONCO A PARTIR DE DADOS DE TLS EM PLANTIOS CLONAIIS DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	70
3.1 INTRODUÇÃO.....	72
3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	73
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS	75
3.3.1 Extração de métricas a partir da nuvem de pontos de TLS	75
3.3.2 Procedimentos analíticos de cubagem de árvores	81
3.3.3 Avaliação dos resultados	83
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
3.4.1 Detecção e Filtragem.....	85
3.4.2 Altura total da árvore.....	89
3.4.3 Comparação entre os volumes obtidos pelo processamento de dados <i>laser</i> terrestre e a cubagem convencional	93
3.5 CONCLUSÕES.....	104
REFERÊNCIAS.....	106
4 AJUSTE DE MODELOS DE AFILAMENTO A PARTIR DA VARREDURA <i>LASER</i> TERRESTRE EM POVOAMENTOS CLONAIIS DE <i>Eucalyptus</i> spp.....	110
4.1 INTRODUÇÃO.....	112
4.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	113
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS	115
4.3.1 Obtenção das séries diamétricas e da altura total do tronco	115
4.3.2 Modelos de afilamento.....	117
4.3.3 Avaliação dos modelos	119
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	122
4.4.1 Correspondência entre as variáveis utilizadas no modelo.....	122
4.4.2 Ajuste dos modelos de afilamento	128

4.4.3 Avaliação dos modelos polinomiais ajustados com dados <i>laser</i> para estimativa de diâmetros e volumes	135
4.5 CONCLUSÕES.....	140
REFERÊNCIAS	141
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	144

1 ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA

1.1 INTRODUÇÃO

O inventário em plantios de *Eucalyptus* spp. é realizado periodicamente pelas empresas do setor florestal com intuito de quantificar estoques de madeira. Atividades importantes realizadas no manejo florestal utilizam os dados levantados no inventário como subsídio à tomada de decisão.

A informação economicamente mais importante de um povoamento florestal é o volume do tronco. Além de estar relacionado com o valor da floresta, o volume (ou sua mudança temporal) pode indicar o sucesso de métodos silviculturais. A medição acurada e direta do volume do tronco pode ser feita com o Xilômetro (método de deslocamento de água). No entanto, consiste em um processo demorado e em uma árvore derrubada (BIENERT *et al.*, 2014).

Para o levantamento de dados em campo são convencionalmente utilizados instrumentos de baixo custo de aquisição e simplicidade de uso, tais como: a fita métrica, a suta e o hipsômetro. A utilização desses instrumentos depara-se com inúmeras incertezas quanto à precisão das medidas do levantamento, devido a erros cometidos pelo operador e pelas características intrínsecas a cada um desses instrumentos.

A necessidade de se obter medidas precisas e modelos matemáticos coerentes com os dados de campo possibilita a inserção do Sensoriamento Remoto para o aprimoramento da mensuração florestal. Nesse contexto, o *laser scanner* terrestre é uma ferramenta potencial porque existe o controle da precisão no levantamento de dados e a possibilidade de se obter as variáveis dendrométricas de forma automatizada.

O levantamento de dados utilizando *laser* terrestre pode ser realizado por meio de uma ou de múltiplas estações. Quando realizado por apenas uma estação, a nuvem de pontos pode ser qualificada como dados de varredura simples. Já o recobrimento mais detalhado da árvore pode ser alcançado utilizando duas ou mais estações. A união de varreduras tomadas em diferentes posições em relação ao objeto de interesse caracteriza um levantamento por varredura múltipla (BUCK, 2011).

diferentes, resultando em erros das estimativas das variáveis dendrométricas (DASSOT *et al*, 2011).

Nesse contexto, o presente estudo foi realizado com intuito de desenvolver uma metodologia para a automatização da modelagem tridimensional de troncos em plantios clonais de *Eucalyptus* spp. a partir de nuvens de pontos de varredura laser terrestre para fins de inventário florestal.

1.1.1 Formulação do problema

O problema de pesquisa consiste em melhorar a precisão das estimativas do volume do tronco de árvores em plantios comerciais de *Eucalyptus* spp. a partir da modelagem de dados da varredura laser terrestre (TLS).

1.1.2 Hipóteses

As hipóteses levantadas para responder o problema de pesquisa podem ser representadas da seguinte forma:

Quanto a detecção de árvores para modelagem do volume do tronco:

A aplicação de um algoritmo parametrizado permite a automatização do processo de detecção de árvores em nuvem de pontos laser terrestre.

Quanto a modelagem do volume individual:

A modelagem do volume do tronco a partir de dados laser terrestre difere estatisticamente dos resultados obtidos por cubagem rigorosa.

Quanto ao ajuste de funções de afilamento:

As funções de afilamento ajustadas a partir do modelo tridimensional do tronco de árvores são mais acuradas que as funções ajustadas a partir de dados de cubagem rigorosa.

1.1.3 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a obtenção do volume do tronco de árvores individuais a partir da modelagem de dados da varredura *laser* terrestre em plantios comerciais de *Eucalyptus* spp.

1.1.4 Objetivos específicos

- Detectar árvores em nuvens de pontos de varredura *laser* terrestre;
- Aplicar técnicas de modelagem tridimensional para obtenção do volume individual do tronco;
- Ajustar funções de afilamento a partir de métricas extraídas da nuvem de pontos de varredura *laser* terrestre e compará-las com funções ajustadas por cubagem rigorosa de árvores.

O levantamento de árvores derrubadas foi realizado posteriormente à medição da parcela. Árvores foram selecionadas e derrubadas para medição da altura total (h_t) e dos diâmetros (d_i) sucessivos ao longo do tronco. A altura total e as alturas parciais foram medidas com o auxílio de uma trena. A medição das extremidades das seções (toras), a cada dois metros de comprimento seguindo o método de *Smalian* (FIGURA 7), foi realizada com uma suta.

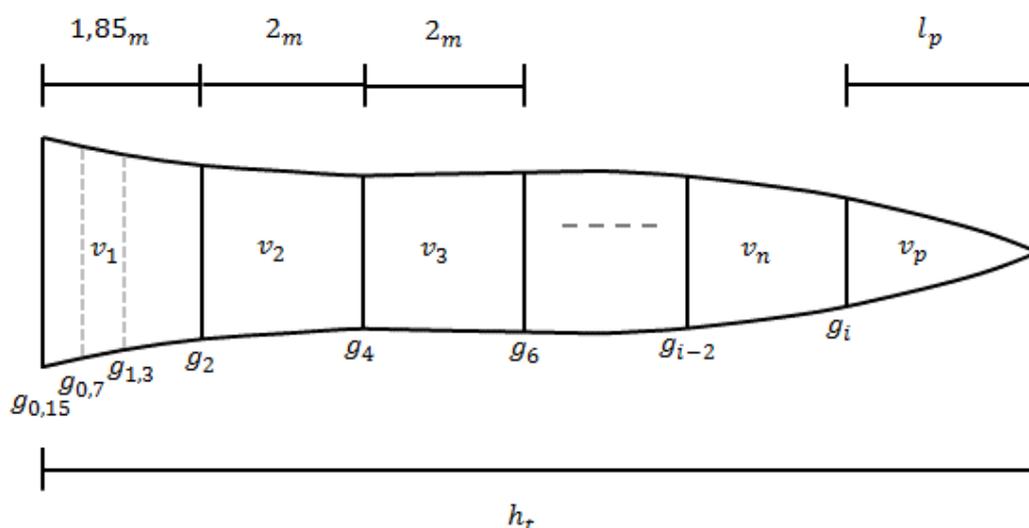


FIGURA 7 – MEDIÇÃO DA ALTURA TOTAL E DE DIÂMETROS AO LONGO DO TRONCO.
 FONTE: ADAPTADO DE MACHADO E FIGUEIREDO FILHO (2006).

Os diâmetros ao longo do tronco foram tomados em duas posições perpendiculares entre si, sendo que a média das duas leituras foi o diâmetro considerado. O resíduo deixado em campo (toco) teve a altura padronizada em 0,15 metros. Na base do tronco, onde ocorre a maior variação da forma e o maior percentual do volume, foram medidas seções a 0,15; 0,70; e 1,30 metros, conforme o padrão adotado pela empresa.

A seleção foi feita aleatoriamente em campo para contemplar indivíduos representativos nos povoamentos clonais de *Eucalyptus urophylla* aos 2 anos e *Eucalyptus urograndis* aos 4 e 5 anos. No povoamento de *Eucalyptus grandis* aos 2 anos não foram derrubadas árvores porque tratavam-se de parcelas permanentes.

O erro de amostragem para as variáveis DAP com casca (TABELA 4), altura total (TABELA 5) e volume com casca (TABELA 6) foi calculado pela fórmula de

De acordo com os resultados obtidos, foi possível verificar que as variáveis DAP com casca e altura total apresentaram erro de amostragem inferior a 10%. Já para variável volume os erros de amostragem foram superiores a 10% para as árvores de 4 e 5 anos, sendo assumidos esses valores para amostragem no trabalho.

1.2.3 Pré-processamento

As múltiplas varreduras geradas no levantamento de campo foram descarregadas do equipamento e submetidas ao pré-processamento. Inicialmente, os dados foram destinados ao Registro e união das varreduras com objetivo de originar apenas uma nuvem de pontos por parcela. Em seguida, para reduzir a nuvem de pontos à área de interesse (400 m²), foi realizada a delimitação da nuvem de pontos da parcela.

1.2.3.1 Registro e união de varreduras

O procedimento de registro é iniciado com a detecção automática dos alvos esféricos nas varreduras por meio da imagem de intensidade em níveis de cinza (FIGURA 8 - A). Entretanto, além dos alvos propriamente ditos, são encontrados outros objetos que foram confundidos com as esferas (FIGURA 8 - B). Dessa forma é necessário, depois da detecção de esferas, indicar manualmente os objetos que correspondem aos alvos para proceder a operação de registro.

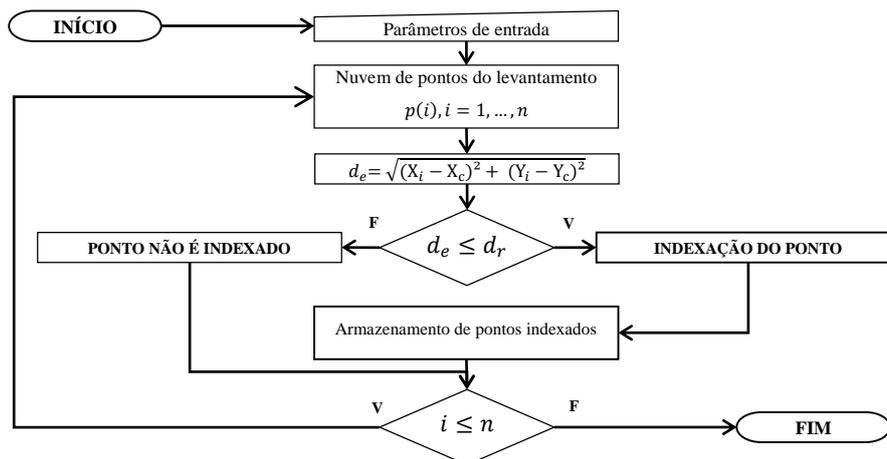


FIGURA 9 – ALGORITMO DE RECORTE
 FONTE: O Autor (2016)

O algoritmo é iniciado com a definição dos seguintes parâmetros de entrada:

d_r : distância adotada para o limiar de recorte;

$X_c; Y_c$: coordenadas métricas da origem da nuvem de pontos.

As nuvens de pontos dos levantamentos por varredura simples (varredura central) e múltiplas foram submetidas à aplicação do algoritmo que inicia uma busca ponto a ponto ($p(i), i = 1, \dots, n$) comparando se o resultado da distância euclidiana (d_e) entre um ponto de coordenadas planas ($X_i; Y_i$) e o centro da nuvem de pontos ($X_c; Y_c$) está dentro do limiar estabelecido para o raio da parcela (d_r). Se a condição $d_e \leq d_r$ for verdadeira o ponto é indexado e armazenado para o recorte da nuvem de pontos da parcela. O limiar de recorte (d_r), que seria de 11,28 m para uma parcela de 400 m², foi ampliado para 14,93 m com objetivo de garantir que todas as árvores da parcela circular instalada em campo estivessem dentro do limite estabelecido, resultando em uma área de 700 m² (FIGURA 10).

ABSTRACT

Terrestrial LIDAR in forest stands is often used to gather data for 3D tree models. However, such models require the detection of points representing trees in the scanning field. The present study offers a method for tree detection from a 3D point cloud of forest plantations. Initially the spatial distribution of trees is reconstructed by applying a segmentation algorithm in a transverse slice (1 meter) through the point cloud. This is followed by an algorithm for detecting tree position based on stand row alignment. Finally, the results are presented for validation by the point cloud user. The methods presented here were tested in circular plots installed in *Eucalyptus* spp. stands scanned by single and multiple scattering LIDAR. Results suggest that several TLS stations should be used to reduce shading effects in mapping circular plots. Employing the tree detection method with the visual analysis of point clouds of each plot were identified 100 % of the trees.

Keywords: forest plantations, single and multiple scan, circular plots, connect components, *Eucalyptus* spp.

em que $d_{P(0-i)}$ é a distância da direção entre o ponto de origem e seu vizinho, E_l é o espaçamento entre árvores na linha de plantio, e l_d é o limite para desvios entre o espaçamento de árvores no plantio.

A segunda condição é a de que o azimute desta direção corresponda a aproximadamente o azimute médio para o quadrante do alinhamento em análise (Inequação 14),

$$(\overline{Az}_{di} - l_a) \leq Az_{P(0-i)} \leq (\overline{Az}_{di} + l_a) \quad (14)$$

em que $Az_{P(0-i)}$ é o azimute da direção i , \overline{Az}_{di} corresponde à média dos azimutes para o respectivo quadrante definido no alinhamento, e l_a é o limite do desvio angular para formação de um alinhamento.

Inicialmente esse procedimento é aplicado para três ou mais vetores de médias ($n \geq 3$) e em seguida para dois vetores de médias ($n=2$) e, por fim, para apenas um vetor de médias ($n=1$).

a) Análise de três ou mais vetores de médias ($n \geq 3$)

A análise de três ou mais vetores de médias é inicialmente realizada com objetivo de classificar a maior quantidade de pontos possível como troncos, já que as condições impostas são satisfeitas quando ocorrem três pontos para formação de um alinhamento em aproximadamente 180° (FIGURA 17).

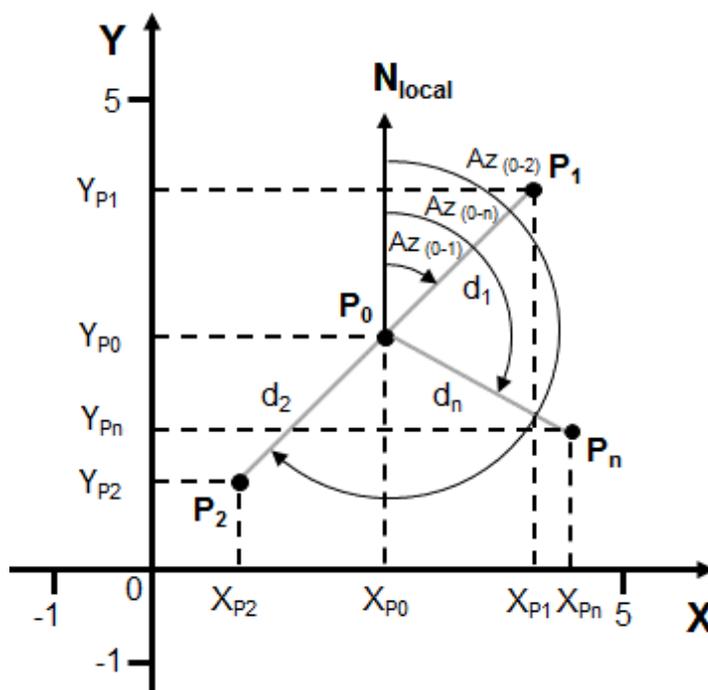


FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DOS VETORES DE MÉDIAS EM UM SISTEMA DE COORDENADAS PLANAS PARA $n \geq 3$

FONTE: O Autor (2016)

* P_0 – Ponto de origem; P_1 , P_2 e P_n – Pontos vizinhos; d_1 , d_2 e d_n – distâncias entre direções; $AZ_{(0-1)}$, $AZ_{(0-2)}$ e $AZ_{(0-n)}$ – azimutes das direções.

Os pontos que não estiverem alinhados são classificados como duvidosos e podem seguir para a próxima etapa de análise.

b) Análise de dois vetores de médias ($n=2$)

A análise de dois vetores de médias é realizada quando o ponto de origem (P_0) ainda não foi classificado como candidato a tronco e apresenta apenas um vizinho dentro do raio de busca pré-estabelecido. Nessa etapa, o ponto que apresentar apenas um vizinho e não satisfizer as condições é classificado como “duvidoso”. No entanto, se o seu vizinho foi previamente classificado como candidato a tronco, ele é classificado como “Não tronco” (FIGURA 18 A e B).

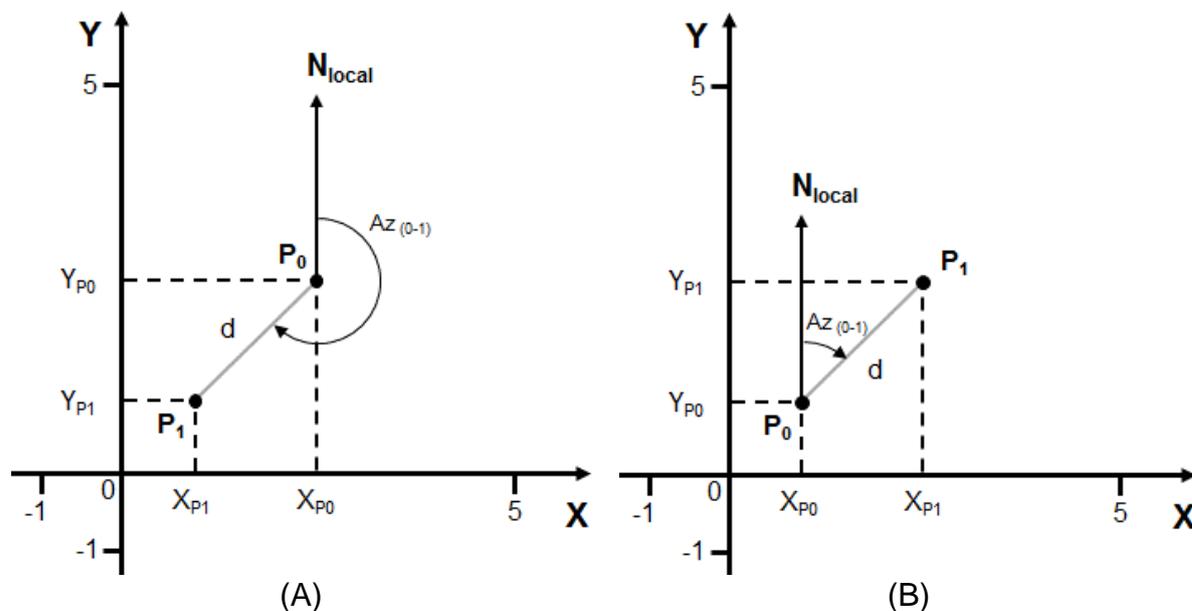


FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DOS VETORES DE MÉDIAS EM UM SISTEMA DE COORDENADAS PLANAS PARA $n=2$

FONTE: O Autor (2016)

* P_0 – Ponto de origem; P_1 – Ponto vizinho; d – distância entre direções; $Az_{(0-1)}$ – azimuth da direção.

A ausência de uma árvore vizinha está comumente relacionada à falha no plantio ou em povoamentos desbastados. No entanto, em levantamentos de parcelas, árvores limítrofes podem apresentar tal característica.

c) Análise de um vetor de médias ($n=1$)

A análise de apenas um vetor de médias ($n=1$) é realizada quando um ponto de origem (P_0) não possui vizinhos dentro do raio de busca pré-estabelecido (FIGURA 19).

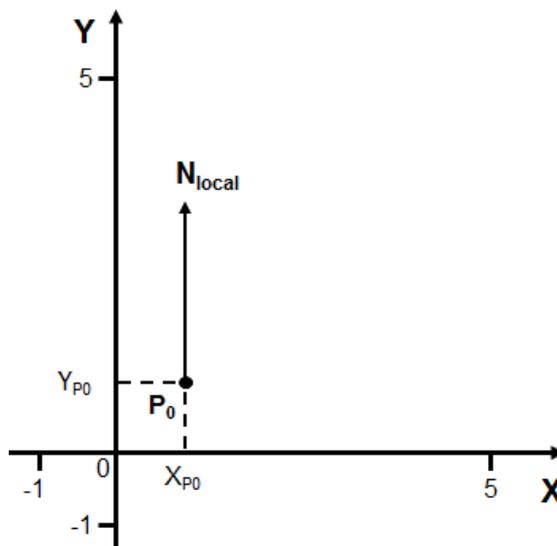


FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO DO VETOR DE MÉDIAS EM UM SISTEMA DE COORDENADAS PLANAS PARA $n=1$
 FONTE: O Autor (2016)

A ocorrência de pontos isolados pode indicar falhas no plantio, desbastes, e árvores limítrofes na parcela. Dessa forma, os pontos isolados são classificados como duvidosos, e devem ser submetidos à análise visual para que possam ser aceitos como candidatos a tronco ou eliminados como não troncos.

2.3.3.3 Pós-classificação

A pós-classificação é realizada para verificar a proximidade entre os vetores de médias selecionados como troncos. Se a distância entre dois vetores for menor ou igual ao limiar pré-estabelecido, os vetores são classificados como duvidosos (Inequação 15),

$$d_{P(0-1)} \leq l_d \quad (15)$$

em que $d_{P(0-1)}$ é a distância do ponto de origem e seu vizinho, e l_d é o limiar aceitável para o espaçamento mínimo entre árvores no plantio (0,60 m). A pós-classificação é realizada para evitar que dois vetores de médias muito próximos sejam classificados erroneamente como troncos.

No entanto, apenas o processo de segmentação não garante que todos os subconjuntos gerados representem o tronco de uma árvore; esses subconjuntos podem representar outros objetos em campo, como, por exemplo, o tripé e o alvo localizados entre linhas de plantio, arbustos e plantas do sub-bosque (FIGURA 24).

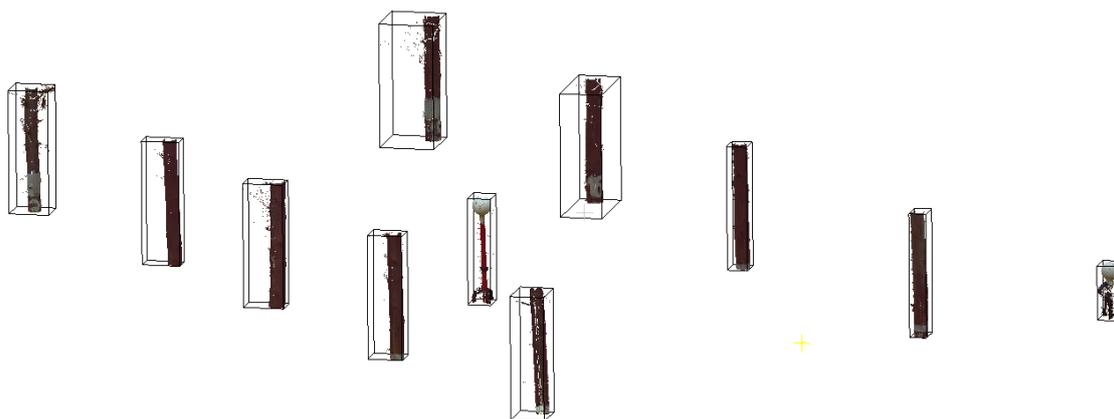


FIGURA 24 – SUBCONJUNTOS DE NUVENS DE PONTOS GERADOS PELO PROCESSO DE SEGMENTAÇÃO.
FONTE: O Autor (2016)

2.4.3 Detecção de árvores

Os vetores de médias foram inicialmente submetidos à uma análise da coordenada média obtida em cada subconjunto no eixo Z. O limiar l_z foi definido em $\pm 0,20\text{m}$ a partir da origem do sistema de coordenadas ($Z=0$).

Após a aplicação dessa restrição os vetores de médias que se encontravam dentro do intervalo estabelecido foram selecionados para as próximas etapas de análise e os demais vetores foram descartados (FIGURA 25 e FIGURA 26).

