



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15743-TDI/1488

**ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA DE POVOAMENTO
CLONAL DE *Eucalyptus sp.* ATRAVÉS DE
LASERSCANNER AEROTRANSPORTADO**

Rodrigo de Campos Macedo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. João Viane Soares e João Roberto dos Santos, aprovada em 27
de fevereiro de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.13.04.40>>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15743-TDI/1488

**ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA DE POVOAMENTO
CLONAL DE *Eucalyptus sp.* ATRAVÉS DE
LASERSCANNER AEROTRANSPORTADO**

Rodrigo de Campos Macedo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. João Viane Soares e João Roberto dos Santos, aprovada em 27
de fevereiro de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.13.04.40>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M19e Macedo, Rodrigo de Campos .
Estimativa volumétrica de povoamento clonal de *Eucalyptus*
sp. através de laserscanner aerotransportado / Rodrigo de Campos
Macedo . – São José dos Campos : INPE, 2009.
143p. ; (INPE-15743-TDI/1488)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientadores : Drs. João Viane Soares e João Roberto dos
Santos.

1. Inventário Florestal. 2. LiDAR. 3. Laserscanner. 4. Modelo
digital de elevação. 5. Estrutura Florestal. I.Título.

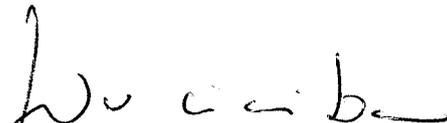
CDU 62:536.24

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dr. João Vianei Soares



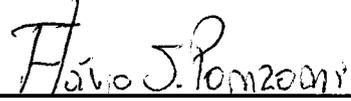
Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. João Roberto dos Santos



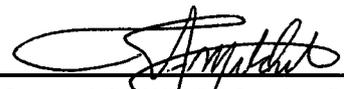
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Edson Aparecido Mitishita



Convidado(a) / UFPR / Curitiba - PR

Aluno (a): Rodrigo de Campos Macedo

São José dos Campos, 27 de fevereiro de 2009

“A luz tem peso e se move em linha curva”

Albert Einstein

Aos que acreditam na experimentação para se alcançar o almejado.

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo financiamento da bolsa de estudos.

Aos orientadores, por terem acreditado e aceitado a proposta de mestrado e, principalmente, por terem dado todo o apoio (científico, logístico, moral) por mim requisitado.

À VCP (Votorantim Celulose e Papel S/A), pelo financiamento do aerolevanteamento e disponibilização de dados e pessoal (equipe de inventário, principalmente Cláudio Roberto Thiersch, Dênis Adriano Rodrigues e Anísio Fernandes Ramos).

Ao LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), pelo auxílio na utilização dos programas Terrasolid[®], particularmente Daniele Felix Zandoná, Fabiano Scheer Hainosz e Marlo Antonio Ribeiro Martins.

Ao DSR/INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), pela disponibilização de equipamentos, transporte e pessoal (Eng^o. Paulo César Gurgel de Albuquerque e Sílvio Antonio Coimbra) para a execução dos levantamentos de campo.

À British Society of Ecology e OBT/INPE e FUNCATE pelo auxílio financeiro para participação no VIII Silvilaser.

À Eliana Pantaleão (DPI, INPE), por possibilitar a gênese do “TreeX”, Sorin Popescu (Texas A&M University), por ceder o TreeVAW, Krzysztof Sterenczak (Warsaw University of Life Sciences), por ceder seu algoritmo ainda anônimo e Benoit St-Onge (University of Quebec), pelas recomendações para segmentação de copas.

Aos colegas de pós-graduação, pelas muitas “dúvidas urgentes” sanadas e outras ainda por sê-las.

À Denise Benetti Ramirez e Ângela Teresa de Campos Macedo, por compreenderem e tolerarem minhas ausências.

RESUMO

O gerenciamento florestal requer dados dendrométricos e topográficos como subsídio aos processos de tomada de decisão. Os meios mais utilizados para isto são os inventários e levantamentos de campo. Com o aprimoramento dos SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) e o aumento das opções de sensoriamento remoto, tais como sensores ativos e passivos de alta resolução espacial, a demanda pela aquisição e pelo processamento de dados dendrométricos e topográficos, se acentuou. Em meados de 1993, sensores opticamente ativos, conhecidos como *laserscanners* começaram a ser utilizados especificamente no meio florestal, visando modelar o terreno e estimar variáveis dendrométricas, como a altura dos povoamentos e, mais recentemente, a quantidade de indivíduos arbóreos, a área de copa e o volume madeireiro, principalmente através da segmentação do dossel florestal. A hipótese é que a estimativa volumétrica realizada com dados obtidos via *laserscanner* aerotransportado é compatível com a estimativa proveniente do inventário florestal tradicional. O objetivo principal é avaliar o potencial da utilização de *laserscanner* aerotransportado para estimativa volumétrica de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.*, em fazendas localizadas em relevo ondulado. Foram sobrevoados 1.554,7 ha em 6 fazendas utilizadas para plantio de Eucaliptos. Dentre as fazendas sobrevoadas, elegeu-se uma – F154-Rosa Helena – para registrar neste documento e realizar as validações necessárias. Localiza-se no município de Igaratá/SP e possui 145,46ha de plantio efetivo com 4 anos de idade. Como sensor, foi utilizado o Optech ALTM 2050, com vôo de 1.000m de altura, *footprint* de 0,25m. A precisão posicional final de 0,12m nas coordenadas X e Y e 0,21m em Z, compatíveis com as características dos produtos validados. A diferença entre as cotas registradas no Modelo Digital de Terreno e mensuradas em campo foi de 0,44m. O erro altimétrico nominal de um aerolevanteamento LiDAR de 1.000m de altura é de 0,15m para locais sem cobertura vegetal. Considerando que não houve presença de vegetação herbácea e não houve diferenciação entre os RMS's obtidos nos perfis com e sem cobertura, em nível ou em desnível, o detalhamento presente no micro-relevo ocasiona o erro posicional planimétrico, que por sua vez, influencia na medida altimétrica. De acordo com as comparações realizadas, os modelos gerados podem ser utilizados para a obtenção de variáveis dendrométricas, requisitos para a modelagem volumétrica. Implementou-se um algoritmo de extração de variáveis dendrométricas e, considerando todas as parcelas medidas em campo, atingiu-se um percentual de erro de -3,52% para quantidade de árvores, -2,26% para altura, +19,36% para área de copa, +5,33% para DAP e -1,8% para volume. A partir da análise dos dados foi possível verificar que apesar do algoritmo subestimar a quantidade de árvores e a altura, e superestimar a área de copa e o DAP, a estimativa volumétrica manteve-se dentro de um intervalo aceitável, tanto em termos de intervalo de confiança, quanto em erro amostral. Diante dos resultados obtidos, aceita-se a hipótese inicial, ou seja, a estimativa volumétrica realizada com dados obtidos via *laserscanner* aerotransportado é compatível com a estimativa proveniente do inventário florestal tradicional.

VOLUMETRIC ESTIMATE OF *Eucalyptus* sp. CLONAL PLANTATION USING AIRBORNE LASERSCANNER

ABSTRACT

Forest management activities usually rely on dendrometric and topographic data as a means to support their decision making processes. For this end, forest inventory and topographic survey are commonly used. The recent advances in GIS and the improvements in the spatial resolution of remote sensing systems, both passive and active ones, largely increased the demand for the acquisition and processing of dendrometric and topographic data. Since 1993, optical active sensors – known as *laserscanners* – started to be specifically used in forest applications for ground modeling and dendrometric parameters estimates, e.g. tree height, and more recently, quantity of trees, crown area, and wood volume, mainly in the segmentation process of the forest canopy. The core hypothesis of this research is that the volumetric estimate carried out with LiDAR data is compatible with estimates of traditional forest inventory techniques (based on ground data). The main objective is then to evaluate the potential of using airborne *laserscanner* for volumetric estimate of clonal plantation of *Eucalyptus* sp., found in steep slope regions. Six farms were select for this study, of which a total area of 1,554.7 ha was sampled. One farm – F154-Rosa Helena – was chosen for detailed records and validation. Such farm is located in the municipality of Igaratá (Sao Paulo State) and owns a four-year old plantation, distributed over an effective area of 145.46 ha. The Optech ALTM 2050 has been employed, with a 0.25 m footprint, acquired by an average flight height of 1,000 m. Its planimetric positional accuracy was 0.12 m (X, Y) and the elevation positional accuracy was 0.21 m (Z). The difference between the elevations of the Digital Terrain Model and the ones obtained by field measurements was of 0.44 m. The nominal elevation error of an airborne LiDAR (with a flight height of 1,000m) is 0.15 m in the case of areas with no vegetation cover. Considering that the study area did not present herbaceous vegetation and that no meaningful difference was observed between the root mean square errors of profiles with and without vegetation cover (both on flat and uneven terrains), it can be stated that the details found in the micro-relief of the study area are to a large extent responsible for the impact of the planimetric errors in the elevation measurements. In general, the maximum height values of the Digital Height Model were smaller than those of the ground data. The generated models can be used for the extraction of dendrometric parameters, necessary for volumetric modeling. A special algorithm for the extraction of dendrometric parameters was implemented using the IDL environment. Considering all plots regarded in this analysis, the error share was 3.52% for the total number of trees; 2.26% for tree height; 19.36% for crown area; 5.33% for Diameter Breast Height (DBH), and 98.2% for volume. The algorithm underestimated the number of trees and their height and overestimated the crown area and DBH. The volumetric estimate is though acceptable. The core hypothesis of this research is thus accepted; since the volumetric estimate executed with airborne *laserscanner* data is compatible with estimates derived from the use of traditional forest inventory techniques.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
1. INTRODUÇÃO	25
2. ÁREA DE ESTUDO	29
3. LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS DOS POVOAMENTOS FLORESTAIS	35
4. AEROLEVANTAMENTO E GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DERIVADOS DE DADOS LASER	57
5. EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA COM DADOS LASER	93
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
APÊNDICE A – ESQUEMA METODOLÓGICO COMPLETO	139
ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DO ALTM 2050.....	143

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 – Organização dos tópicos.....	28
2.1 – Uso da terra em São José dos Campos, Vale do Paraíba, Estado de São Paulo e aptidão de uso da terra para o Vale do Paraíba.....	31
2.2 – Vista aérea da fazenda F154-Rosa Helena	32
2.3 – Uso da terra da fazenda F154-Rosa Helena.....	34
3.1 – Conceito de área basal	36
3.2 – Fluxograma de atividades relacionadas aos levantamentos de campo	41
3.3 – Equipamentos utilizados.....	43
3.4 – Parcela e convenção utilizada para identificação das árvores	45
3.5 – Coleta de dados dendrométricos.....	46
3.6 – Rastreamento simultâneo de L1L2 (base) e L1 (sub-base).....	47
3.7 – Localização das parcelas	49
3.8 – Distribuições diamétrica e hipsométrica.....	51
3.9 – Relações empíricas entre as principais variáveis dendrométricas	52
3.10 – Localização dos perfis topográficos	54
3.11 – Pontos cotados a cada 2,5m.....	55
4.1 – Princípio de funcionamento de um LASER	58
4.2 – Diferenciação entre onda não-coerente e coerente	59
4.3 – Regiões espectrais utilizadas por LASER e MASER.....	59
4.4 – Retroespalhamento da vegetação e transmitância atmosférica para diversas regiões do espectro eletromagnético	60
4.5 – Sistemas de medição da diferença entre emissão e recepção do sinal.....	61
4.6 – <i>Footprint</i> e suas consequências em alvos tridimensionais	62
4.7 – Registro de diferentes retornos em uma cobertura florestal	63
4.8 – Tipos de varredura. A) perfilômetro (ausência de scanner); B) laserscanner	64
4.9 – Relação entre espelhos e padrão de varredura no terreno	65
4.10 – Esquema representativo da largura de faixa	66
4.11 – Padrão heterogêneo de varredura do espelho oscilante	67
4.12 – Movimentos de deriva que ocorrem durante o voo	68
4.13 – Sistemas LiDAR e seus subsistemas	69
4.14 – Fluxograma de atividades e produtos decorrentes da aquisição de dados LIDAR	73
4.15 – Aeronave utilizada.....	75
4.16 – Sensor ALTM 2050.....	76
4.17 – Pré-processamento.....	78
4.18 – Fragmentação da área de estudo (perímetro) em 6 blocos	78
4.19 – Parâmetros de ajuste para classificação de pontos	80
4.20 – Proporção entre as classes de pontos.....	82
4.21 – Imagem Intensidade gerada a partir dos pontos de superfície.....	84
4.22 – Imagem Intensidade gerada a partir dos pontos de terreno	84
4.23 – Imagem Hipsométrica gerada a partir dos pontos de superfície.....	85
4.24 – Imagem Hipsométrica gerada a partir dos pontos de terreno	85
4.25 – Modelo Digital de Superfície	86

4.26 – Modelo Digital de Terreno	86
4.27 – Detalhe tridimensional referente à gleba 2	87
4.28 – Comparação entre o MDT e os perfis longitudinais.....	88
4.29 – Modelo Digital de Altura dos alvos.....	91
5.1 – Fluxograma de atividades e produtos decorrentes da análise de dossel e estimativa volumétrica	99
5.2 – Esquema ilustrativo da lógica de Máximas Locais..	100
5.3 – Esquema ilustrativo da lógica de Crescimento por Região..	100
5.4 – Interface do algoritmo implementado.....	102
5.5 – Duas imagens geradas pelo algoritmo. A) Máximas locais; B) Crescimento por região.	103
5.6 – Censo digital em fotografia aérea de alta resolução.	100
5.7 – Análise de resíduos de regressão da quantidade de árvores estimada via algoritmo.	106
5.8 – Intervalos de confiança (95%) para a a quantidade de árvores mensuradas em campo e estimadas via algoritmo.	106
5.9 – Intervalos de confiança (95%) para a quantidade de árvores mensuradas via censo digital e estimadas via algoritmo.....	108
5.10 – Análise de resíduos de regressão da altura total estimada via algoritmo.	110
5.11 – Análise de resíduos de regressão da área de copa estimada via algoritmo.....	110
5.12 – Intervalos de confiança (95%) para a altura total mensuradas em campo e estimadas via algoritmo.	111
5.13 – Intervalos de confiança (95%) para a área de copa mensuradas em campo e estimadas via algoritmo.	111
5.14 – Análise de resíduos de regressão do DAP estimado via algoritmo.	113
5.15 – Intervalos de confiança (95%) para o DAP mensurados em campo e estimados, a partir da altura total obtida via algoritmo.	114
5.16 – Análise de resíduos de regressão do volume por ha obtido por função de afilamento utilizando-se os dados extraídos via algoritmo.	116
5.17 – Intervalos de confiança (95%) para o volume de madeira estimado com dados de campo e estimado com dados extraídos via algoritmo, por função de afilamento	116
5.18 – Análise de resíduos de regressão do volume por ha obtido por equação volumétrica utilizada em fotogrametria, com os dados extraídos via algoritmo..	119
5.19 – Intervalos de confiança (95%) para o volume de madeira estimado com dados de campo e estimado com dados extraídos via algoritmo, por equação volumétrica utilizada em fotogrametria.....	120

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 – Lista de fazendas e informações complementares.....	29
2.2 – Cobertura e uso da terra da fazenda F154-Rosa Helena.....	33
2.3 – Detalhamento dos talhões da fazenda F154-Rosa Helena.....	34
3.1 – Processamento e transporte das coordenadas	48
3.2 – Variáveis dendrométricas ao nível de parcela	50
3.3 – Área basal e volume total com casca.....	53
3.4 – Medidas dos perfis longitudinais.....	56
3.5 – Erros posicionais	56
4.1 – Características florestais e derivações LiDAR.....	72
4.2 – Quantidade de pontos	79
4.3 – Estrutura básica do arquivo de pontos.....	79
4.4 – Comparação entre pontos cotados em campo e extraídos do MDT	90
4.5 – Comparação entre MDA e alturas máximas medidas em campo, ao nível de parcela.....	92
5.1 – Comparação entre quantidade de árvores mensuradas em parcelas de campo e estimadas via algoritmo	105
5.2 – Comparação entre quantidade de árvores mensuradas via censo digital e estimadas via algoritmo.....	107
5.3 – Comparação entre altura/área de copa mensuradas em campo e estimadas via algoritmo.....	109
5.4 – Comparação entre DAP mensurados em campo e estimados a partir da altura total extraída via algoritmo.....	112
5.5 – Comparação entre volume por ha estimado a partir dos dados de campo e estimado com dados extraídos via algoritmo, utilizando função de afilamento.	115
5.6 – Comparação entre volume por ha estimado a partir dos dados de campo e estimado com dados extraídos via algoritmo, utilizando equação volumétrica oriunda da fotogrametria.	118

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALS	Airborne Laser Scanner
ALSM	Airborne Laser Swath Mapping
ALTM	Airborne Laser Terrain Mapping
(D)GPS	(Differential) Global Position System
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LaDAR	LASER Detection And Ranging
LASER	Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	Light Detection And Ranging
MASER	Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation
MDA	Modelo Digital de Alturas
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
RaDAR	Radio Detection And Ranging
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SMI	Sistema de Medição Inercial
VCP	Votorantim Celulose & Papel S/A

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Ângulo de Varredura
γ	Ângulo de Divergência do Pulso
A_c	Área de Copa
c	Velocidade da luz (3×10^8 m/s)
CAP	Circunferência a Altura do Peito
DAP	Diâmetro a Altura do Peito
D_f	Densidade Foliar ou Cobertura Foliar
d_t	Diferença de tempo entre emissão e detecção de um pulso
E	Erro Amostral
E_p	Erro Planimétrico
f	Fator de Forma
F	Footprint
g ou G	Área Basal
h	Altura (de árvore ou de vôo, dependendo do contexto)
ht	Altura Total
IC	Intervalo de Confiança
Im	Intensidade Refletida
L	Largura de Faixa
Pe	Potência Emitida
r	Refletividade da Superfície
R	Distância (Range)
RMS	Valor Quadrático Médio ou <i>Root Mean Square</i>
S	Distância
t	t de Student
V	Volume
$VTCC$	Volume Total com Casca

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento florestal requer dados dendrométricos e topográficos como subsídio aos processos de tomada de decisão. Os meios mais utilizados para isto são os inventários e levantamentos de campo. Com o aprimoramento dos SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) e o aumento das opções de sensoriamento remoto, tais como sensores ativos e passivos de alta resolução espacial, a demanda pela aquisição e pelo processamento de dados dendrométricos e topográficos se acentuou. Em meados de 1993¹, sensores opticamente ativos, conhecidos como *laserscanners* começaram a ser utilizados especificamente no meio florestal, visando a modelar o terreno e a estimar variáveis dendrométricas, como a altura dos povoamentos e, mais recentemente, a quantidade de indivíduos arbóreos, a área de copa e o volume madeireiro, principalmente através da segmentação do dossel florestal.

A estimativa volumétrica depende da aquisição de dados dendrométricos. Tradicionalmente, esta aquisição é realizada com amostragens em parcelas de campo, medindo-se, muitas vezes, menos que 5% da área total. É possível melhorar esta estimativa sem aumento do esforço amostral através de estratificações, utilizando-se principalmente duas variáveis-chaves: altura – de difícil obtenção em campo – e quantidade de indivíduos arbóreos – sensível a qualquer distorção relacionada à medida de área. Além desta melhoria da estimativa, é possível realizar um inventário estritamente remoto, utilizando-se equações volumétricas que substituem o DAP (diâmetro à altura do peito) por diâmetro de copa². Neste caso há alguns benefícios, tais como censo ao invés de amostragem em parcelas de campo e, principalmente, automação de processos relacionados à estimativa das variáveis dendrométricas, de forma mais objetiva e controlável. Justifica-se esta pesquisa pelo fato de se viabilizar a

¹ A partir de 2000, no Brasil

² Ou substituem a área basal pela área de copa

estratificação por altura e quantidade de indivíduos arbóreos e o inventário florestal remoto.

A hipótese do presente trabalho é que a estimativa volumétrica realizada com dados obtidos via *laserscanner* aerotransportado seja compatível com a estimativa proveniente do inventário florestal tradicional. Espera-se que se possa estabelecer relações empíricas significativas entre variáveis medidas em campo e as variáveis derivadas através de processamento de dados do *laserscanner*. A motivação desta pesquisa está na expectativa de operacionalizar a estimativa volumétrica com *laserscanner* aerotransportado para agregar valor aos produtos oferecidos ao gerenciamento florestal como um todo.

O objetivo principal é avaliar o potencial de utilização desta tecnologia para estimativa volumétrica de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.*, em áreas de relevo ondulado. Dentre os objetivos específicos tem-se:

- a. gerar Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Alturas (MDA);
- b. validar MDT e MDA;
- c. extrair e validar as variáveis dendrométricas a partir do MDA;
- d. gerar a estimativa volumétrica com dados obtido via *laserscanner* e;
- e. mostrar a significância dos resultados, comparando-se com dados de inventário florestal de campo, através dos intervalos de confiança.

Este documento foi dividido em seis capítulos: 1) Introdução; 2) Área de estudo; 3) Levantamento de parâmetros estruturais dos povoamentos florestais – mensurados em campo e utilizados como referências para validações e comparações; 4) Aerolevantamento e geração de modelos digitais derivados de dados LASER – fundamentação e geração dos modelos digitais, principalmente do MDA, insumo básico para a estimativa automatizada das variáveis dendrométricas; 5) Extração de variáveis

dendrométricas e estimativa volumétrica com dados LASER – detalhamentos sobre o algoritmo utilizado para possibilitar a estimativa automatizada das variáveis dendrométricas e, 6) Conclusões e recomendações. Os tópicos referentes à fundamentação teórica, materiais & métodos e discussão dos resultados estão incluídos nos capítulos 3, 4 e 5. A figura 1.1 ilustra a organização dos tópicos.

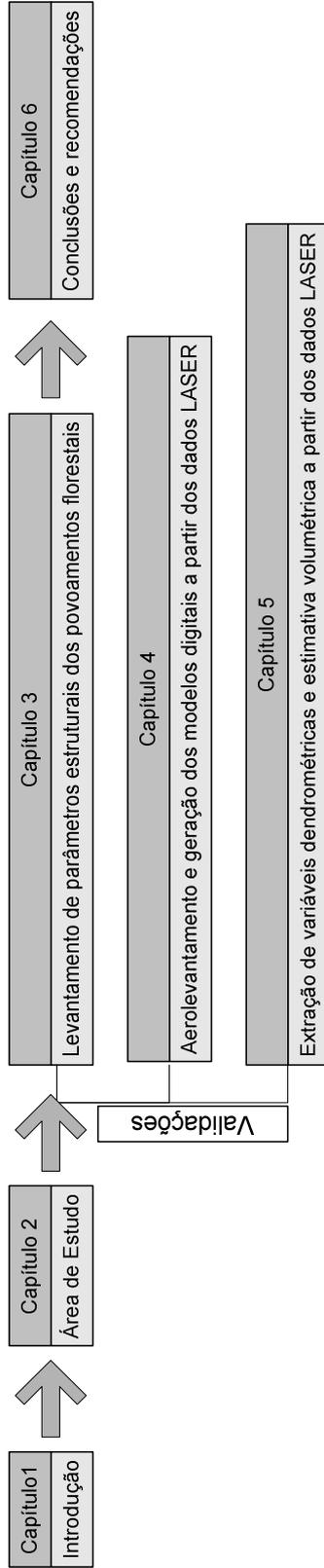


Figura 1.1 – Organização dos tópicos

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1 Caracterização geográfica e climatológica

Foram sobrevoados 1.554,7 ha em 6 fazendas utilizadas para plantio de Eucaliptos pela Votorantim Celulose & Papel (VCP). As fazendas estão localizadas nos municípios Igaratá, São José dos Campos (distrito de São Francisco Xavier) e Monteiro Lobato, todos no Vale do Paraíba, Estado de São Paulo; contém diversas idades e regimes, tais como fazendas próprias, arrendadas e fomentadas (23°00'S,46°00'W; 23°15'S,46°15'W). A tabela 2.1 lista as fazendas e traz informações complementares.

Tabela 2.1 – Lista de fazendas e informações complementares

Gleba	Fazenda	Município	Regime	Data de Plantio	Area Total (ha)	Area Plantada (ha)	Efetivo (%)	Idade (anos)
F053	São Roque	São José dos Campos	Fomento	dez/05	39,32	24,86	63,22	2,33
F059	Cascatinhas Roncadoras	São José dos Campos	Fomento	dez/03	45,33	29,12	64,24	4,33
F086	São Roque	São José dos Campos	Fomento	jan/07	95,35	76,26	79,98	1,25
F154	Rosa Helena	Igaratá	Arrendamento	mai/04	266,04	145,54	54,71	3,92
F736	Santa Terezinha I	São José dos Campos	Própria	nov/02	981,35	519,42	52,93	5,42
F737	Santo Antonio II	Monteiro Lobato	Arrendamento	jul/01	127,31	73,64	57,84	6,83
Total					1554,7	868,84	55,88	

Fonte: Adaptada de VCP (Cadastro Florestal)

As fazendas estão inseridas em um ecogeossistema chamado de “mar de morros” (TROPPIAIR, 1983), com enclaves de floresta tropical latifoliada (CHIARINI e COELHO, 1969). Grande parte da região (49,04%) era constituída por campos e capoeiras (SERRA FILHO et al., 1974), na maioria decorrente da destruição da vegetação nativa (LONG, 1953). Rizzini (1963) a classifica como Província Atlântica, Sub-Província Austro-Oriental, Setor Cordilheira Marítima, Sub-Setor Baixo-Montano. Para Veloso (1966), classifica-se como Floresta Pluvial Estacional Tropical Perenifólia do Planalto Centro-Sul, enquanto que para Andrade-Lima (1966), pertencente à Formação Florestal Estacional Latifoliada Subcaducifólia Subtropical (Floresta Subtropical) e para Hueck (1972) pertence à Região das Matas Subtropicais do Leste e do Sul do Brasil.

O clima, de acordo com Molion (1975), é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen. Há uma estação seca de inverno, com totais mensais de precipitação inferiores

a 50mm, compreendida entre abril e setembro. O total anual médio de precipitação é de 1.100mm e os desvios relativos observados são de, aproximadamente 30%. A temperatura média do ar oscila entre 17,7° em julho e 23,9° em fevereiro, com média anual de 21,3°, o que caracteriza um clima ameno (SILVA, 1989). A umidade relativa média não varia consideravelmente durante o ano, apresentando média de 76% com desvios relativos de 30%. Os ventos médios dominantes à superfície são fracos, de 2 a 3km/h, soprando de sudeste durante o ano todo.

O solo predominante pertence à unidade de mapeamento Latossolo Vermelho-Amarelo fase rasa (BRASIL, 1960), mas é possível que também ocorram Cambissolos e Podzólicos, dependendo das variações topográficas, mas todos de textura argilosa, perfil A moderado ou proeminente, com relevo forte ondulado ou montanhoso (LEPSH e OLIVEIRA, 1987; EMBRAPA, 1999).

Considerando as condições de susceptibilidade à erosão, bacias de acumulação de represas, recreação e turismo, o município foi colocado como área crítica de reflorestamento, ou seja, com ações prioritárias relacionadas ao reflorestamento (ESTADO DE SÃO PAULO, 1975).

Veiga (1967) registrou alguns dados sobre a ocupação e uso da terra no Vale do Paraíba, concluindo que a localização dos plantios comerciais seguiu as diretrizes estabelecidas no Programa Florestal SP, de 1970, referentes principalmente à conservação e recuperação das matas ciliares. Afirma ainda que 76,48% de todo reflorestamento realizado no Vale do Paraíba foi realizado com eucaliptos. Segundo o mesmo autor, São José dos Campos e Igaratá estão inseridas em áreas prioritárias para o reflorestamento.

De acordo com Estado de São Paulo (1974), o Vale do Paraíba possuía 1.429.100ha, com aptidão para silvicultura e conservação de florestas silvestres. Para fins comparativos, na figura 2.1 encontram-se os gráficos de ocupação e uso da terra em São José dos Campos, Vale do Paraíba e Estado de São Paulo, além da aptidão proposta para o Vale do Paraíba, pelo Zoneamento Agrícola de 1974. Era evidente o predomínio da atividade pecuária, apesar da aptidão florestal do Vale do Paraíba.

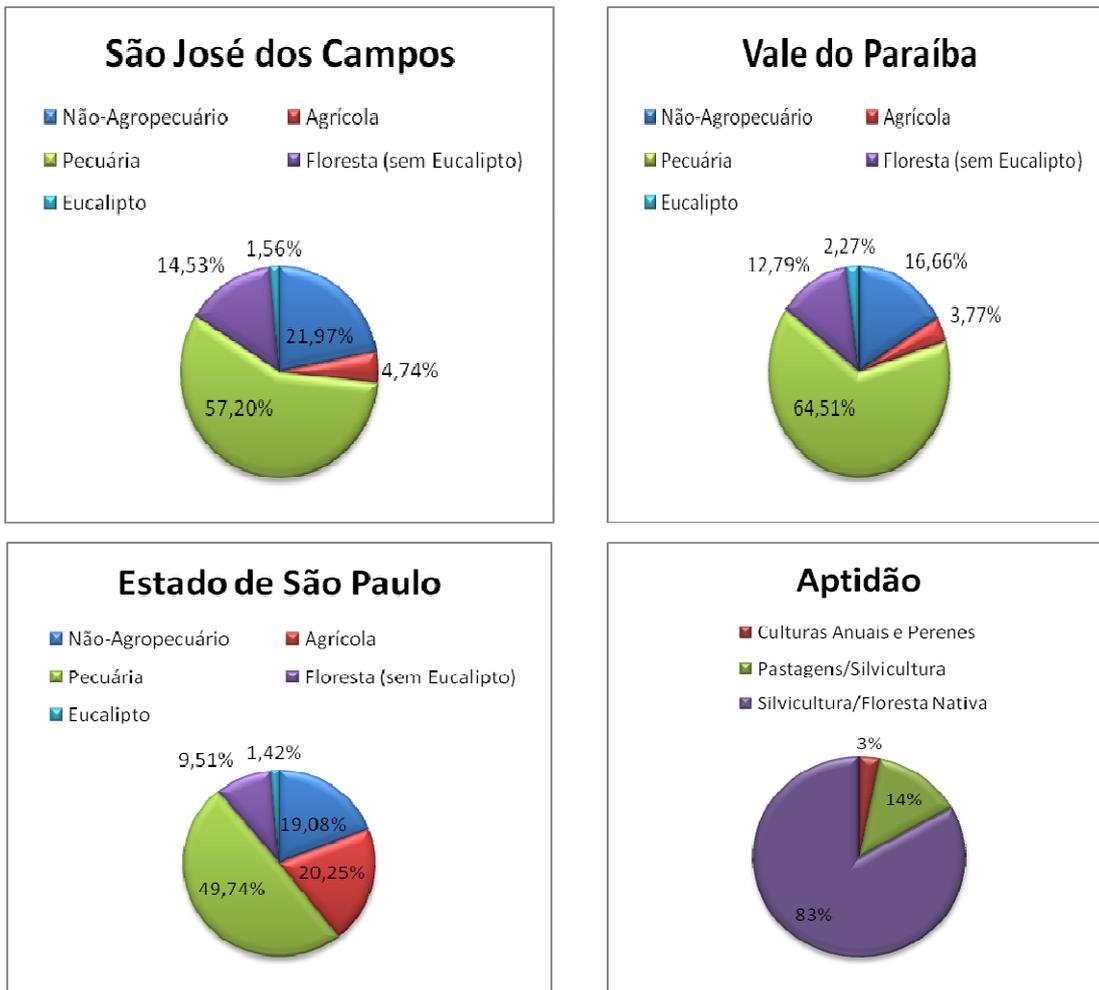


Figura 2.1 – Uso da terra em São José dos Campos, Vale do Paraíba, Estado de São Paulo e aptidão de uso da terra para o Vale do Paraíba

Fonte : Adaptada de VEIGA (1975) e ESTADO DE SÃO PAULO (1974; 1975)

O Vale do Paraíba fornecia 6,33% da madeira de eucalipto consumida no Estado de São Paulo, enquanto que São Jose dos Campos fornece 2,55% (ESTADO DE SAO PAULO, 1974).

2.2 Seleção da área de estudo

Dentre as fazendas sobrevoadas, elegeu-se uma – F154-Rosa Helena – para realizar as validações necessárias. Escolha justificada pelo fato de se conhecer a quantidade de indivíduos arbóreos em 3 de seus 9 talhões³, dado enriquecedor para a validação da quantidade de árvores por ha. Na figura 2.2 há uma fotografia aérea que permite uma vista geral da área de estudo.

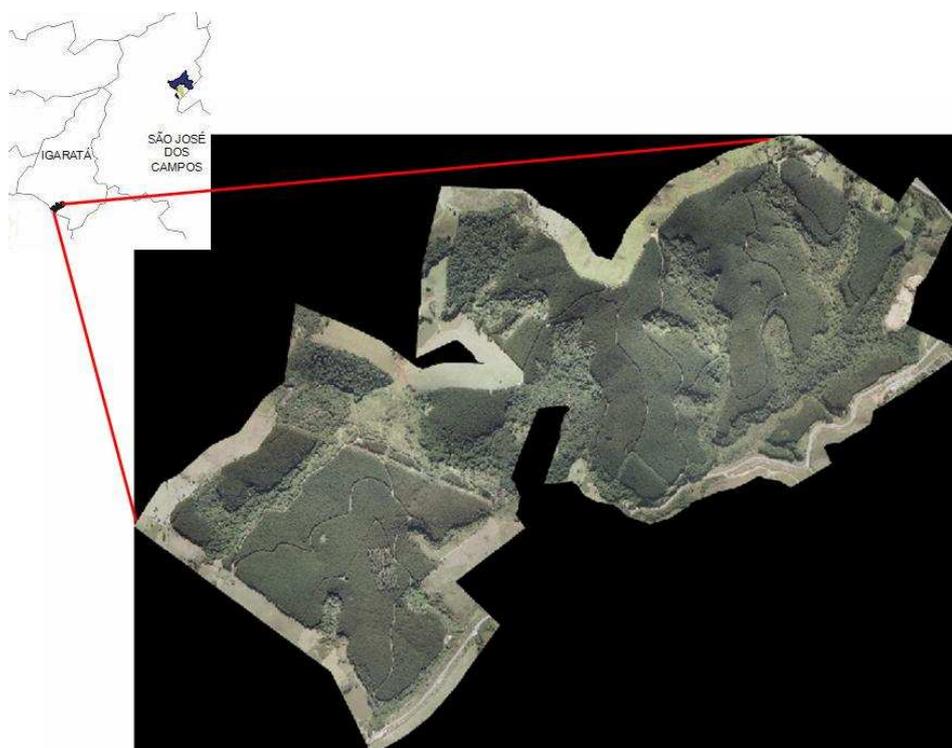


Figura 2.2 – Vista aérea da fazenda F154-Rosa Helena

Fonte: Adaptada de VCP (Aerolevantamento 1:10.000, de 2007)

³ Censo realizado digitalmente em fotografia aérea de alta resolução

De acordo com o Levantamento Planialtimétrico de 2007, a fazenda possui 45,37ha de Área de Preservação Permanente, 61,35ha de Reserva Florestal Legal e 145,46ha de plantio efetivo, detalhados na tabela 2.2⁴. Trata-se da primeira rotação de um segundo ciclo de plantio (área reformada).

Tabela 2.2 – Cobertura e uso da terra da fazenda F154-Rosa Helena

Descrição	ha	%	Descrição	ha	%	Descrição	ha	%
Vegetação nativa (ha)	26,52	9,90	Vegetação nativa (ha)	44,01	16,42	Efetivo plantio (ha)	145,46	54,28
Área em recuperação (ha)	7,22	2,69	Área em recuperação (ha)	1,08	0,40	Estradas (ha)	6,97	2,60
Área úmida (ha)	6,24	2,33	Área úmida (ha)	8,68	3,24	Aceiros (ha)	3,83	1,43
Eucalipto incorporado (ha)	0,64	0,24	Eucalipto incorporado (ha)	5,74	2,14	Rede elétrica (ha)	2,47	0,92
Pinus (ha)	0,49	0,18	Pinus (ha)	0,48	0,18	Bambu (ha)	2,00	0,75
Capoeira (ha)	1,62	0,60	Capoeira (ha)	1,36	0,51	Represa (ha)	0,45	0,17
Plantio em desacordo (ha)	2,64	0,99				Construções (ha)	0,08	0,03
Área de Preservação Permanente	45,37	16,93	Reserva Florestal Legal	61,35	22,89	Outros	161,26	60,18
Área Total							267,98	100,00

Fonte: Adaptada de VCP (Levantamento Planialtimétrico de 2007)

Na figura 2.3 é possível visualizar as áreas de efetivo (eucaliptos) e não-efetivo (restante), hidrografia e curvas de nível⁵, intercaladas a cada 10m (principais) e 5m (secundárias).

A área de plantio efetivo da fazenda foi parcelada em 2 glebas, divididas em 9 talhões, detalhados na tabela 2.3.

⁴ Diferença de 1,94ha em relação à área total registrada no Cadastro Florestal, devido à atualização cartográfica realizada após o aerolevanteamento de 2007

⁵ Geradas a partir da digitalização das Cartas Topográficas do IGC (Instituto Geográfico Cartográfico)

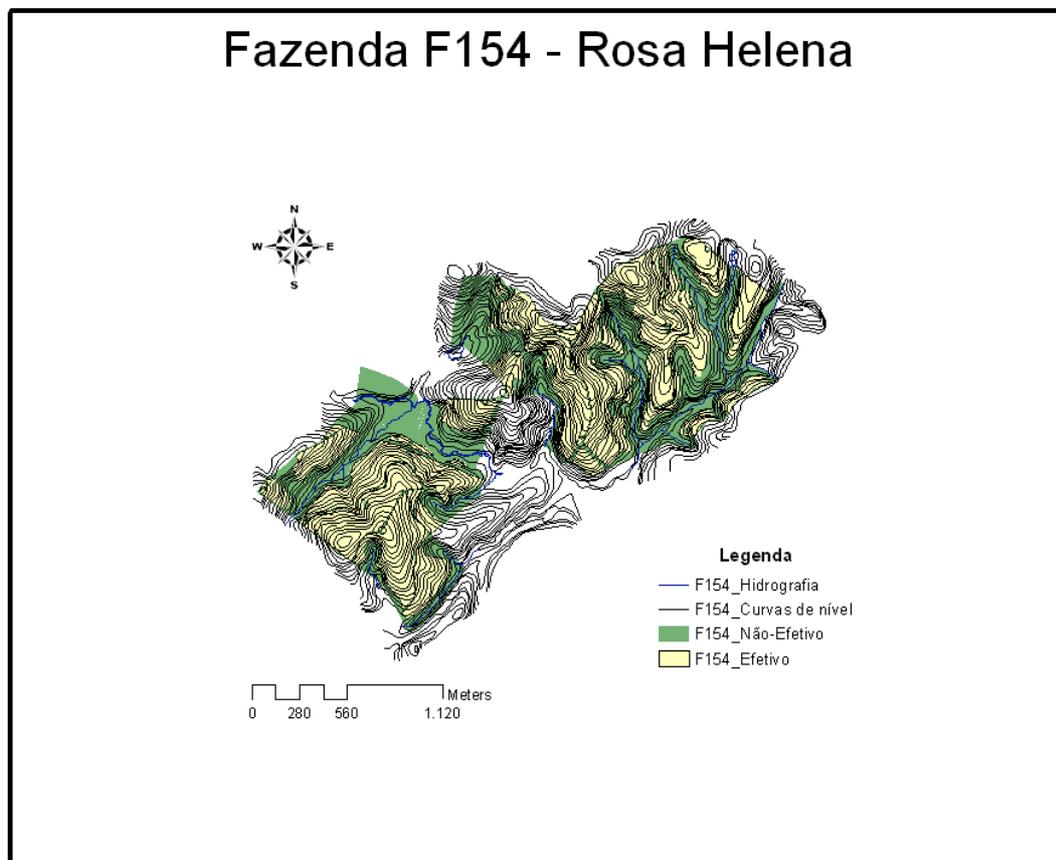


Figura 2.3 – Uso da terra da fazenda F154-Rosa Helena

Fonte : Adaptada de VCP (Levantamento Planialtimétrico de 2007)

Tabela 2.3 – Detalhamento dos talhões da fazenda F154-Rosa Helena

Gleba	Talhão	Clone	Data de Plantio	Área (ha)
1	1	TC31-H	17/05/2004	23,12
1	2	C041-H	13/05/2004	26,58
1	3	TC31-H	15/05/2004	23,16
1	4	C041-H	07/05/2004	7,35
2	5	P4295-H	27/05/2004	5,21
2	6	C219-H	28/05/2004	17,81
2	7	C219-H	25/05/2004	28,03
2	8	C219-H	19/05/2004	10,36
2	9	P4295-H	28/05/2004	3,84
Total				145,46

Fonte: Adaptada de VCP (Levantamento Planialtimétrico de 2007)

3. LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS DOS POVOAMENTOS FLORESTAIS

Neste capítulo estão registrados todos os tópicos referentes aos levantamentos de campo (dendrométricos, topográficos e geodésicos), envolvendo a fundamentação teórica, procedimentos metodológicos e discussão dos resultados.

3.1 Fundamentação

Este tópico trata dos conceitos teóricos que são essenciais ao entendimento do capítulo. São abordados temas como variáveis dendrométricas, inventários florestais e levantamentos topográficos e geodésicos.

Variáveis dendrométricas são mensurações relacionadas às árvores, geralmente buscando-se aprimorar o conhecimento sobre a estrutura de um povoamento arbóreo. As mais comuns são: área basal e altura.

A área basal é calculada a partir das medidas de Circunferência a Altura do Peito (CAP) ou Diâmetro a Altura do Peito (DAP). A equação 3.1 expressa a conversão de CAP p/ DAP e a equação 3.2 o cálculo da área basal.

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (3.1)$$

onde: *DAP* = Diâmetro a Altura do Peito; *CAP* = Circunferência a Altura do Peito

$$g = \frac{\pi \cdot DAP^2}{4} \quad (3.2)$$

onde: *g* = Área Basal

A área basal de uma única árvore é chamada também de área seccional. Em geral, somam-se as áreas seccionais das árvores e extrapola-se por unidade de área (g/ha,

geralmente). (MARTIN, 1989). A figura 3.1 ilustra o conceito de área basal, tal como o somatório das áreas seccionais (em preto na figura) dos fustes.

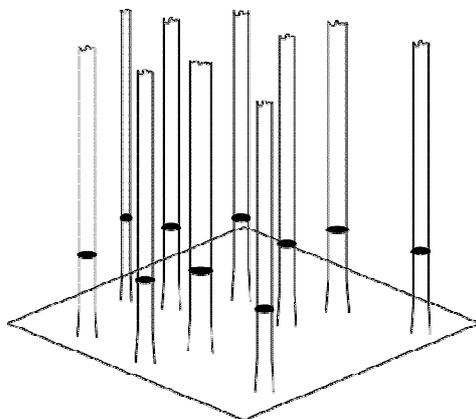


Figura 3.1 – Ilustração do conceito de área basal

A altura arbórea é uma variável de grande importância na caracterização florestal, pois é utilizada para descrever quantitativamente e qualitativamente um povoamento florestal. É utilizada na estimativa volumétrica e de idade, além de ser um índice comumente utilizado para classificar sítios florestais (Índice de Sítio), em função da idade das árvores e da saúde do povoamento (SCHRENDER et al., 1993).

Teoricamente, conhecendo a área basal (bidimensional) e a altura (unidimensional), obtém-se o volume (tridimensional). Porém, as árvores não possuem necessariamente formas geométricas analíticas. Então, torna-se necessário modelar o formato de um indivíduo arbóreo⁶, determinando-se o fator de forma (HUSCH et al., 1982). Os fustes das árvores são variados, influenciados em grande parte da capacidade genética da espécie e meio onde se desenvolvem (condições de crescimento, competição por luz, nutrientes, água, etc.). Como regra geral, há um decréscimo paulatino do diâmetro das árvores, da base até o ápice. Este fenômeno é denominado afunilamento ou conicidade e

⁶ Isto é feito através de uma cubagem

é percebido não somente na árvore inteira como também em seções cilíndricas (VEIGA, 1978).

De acordo com a relativa regularidade do fuste, é possível tentar uma definição em termos de geometria euclidiana, resultando diretamente no cálculo do volume. Por razões práticas, trata-se de assemelhar a forma da árvore a de algum corpo geométrico conhecido, pertencente ao grupo dos denominados tipos dendrométricos, representados através de modelos matemáticos básicos, que fundamentam a teoria geométrica dos fustes. São funções gerais que consideram um par de coordenadas, geram distintos corpos ou sólidos de revolução. A representação matemática do fuste da árvore pode ser descrita através do seccionamento conceitual em três partes, resultando em figuras truncadas do Neiloide, Parabolóide e Cone (LOETSCH e HAALER, 1973). Husch et al. (1982) apresentaram a mesma seqüência como sendo Cilindro, Tronco de Neiloide, Tronco de Parabolóide e Cone, no sentido base-topo.

Considerando a descrição acima, a estimativa volumétrica das árvores requer o uso de uma série de fatores de correção convencionais. Desta maneira, calcula-se o volume do fuste como o volume de alguns corpos geométricos conhecidos, corrigidos pelo “fator ou coeficiente de forma”, que descreve a variação do diâmetro com a altura. Em geral, a prática de inventários comerciais, para simplificar os cálculos, assume que o corpo geométrico mais semelhante à árvore é um cilindro. Seu volume é obtido como o volume de um cilindro multiplicado por um fator de correção ou redução, que deve ser calculado em cada caso particular. Os fatores de forma indicam uma relação entre o volume real da árvore e o volume do corpo geométrico a qual se assemelha (HARRY, 1971; LOETSCH et al., 1973; PHILIP, 1983; SCHRENDER et al., 1993).

A construção de equações de volume (V) requer a escolha das variáveis dependentes e independentes. De acordo com Veiga (1984), podem ser:

- Somente DAP (relaciona Volume com DAP) – $V = f(\text{DAP})$;
- DAP e altura (h), relaciona Volume com DAP e altura – $V = f(\text{DAP}, h)$;

- DAP, altura (h) e fator de forma (f), relaciona volume com DAP, altura e forma
– $V = f(\text{DAP}, h, f)$.

Teoricamente, quanto mais variáveis, melhor é a estimativa. (SPURR, 1952; AVERY, 1967).

Foram utilizados modelos polinomiais de quinto grau nas funções de afilamento (*taper*) para o cálculo de volume. A expressão que permite estimar os volumes correspondentes a qualquer porção da árvore, além do volume total, está apresentada na equação 3.3 (FERREIRA, 2004).

$$\begin{aligned}
 V = KD^2 & \left[c_0^2 h_i + c_0 c_1 h_i^2 + \left(\frac{2}{3} c_0 c_2 + \frac{1}{3} c_1^2 \right) h_i^3 + \left(\frac{1}{2} c_0 c_3 + \frac{1}{2} c_1 c_2 \right) h_i^4 + \right. \\
 & + \left(\frac{2}{5} c_0 c_4 + \frac{2}{5} c_1 c_3 + \frac{1}{5} c_2^2 \right) h_i^5 + \left(\frac{1}{3} c_0 c_5 + \frac{1}{3} c_1 c_4 + \frac{1}{3} c_2 c_3 \right) h_i^6 + \\
 & + \left(\frac{2}{7} c_1 c_5 + \frac{2}{7} c_2 c_4 + \frac{1}{7} c_3^2 \right) h_i^7 + \left(\frac{1}{4} c_2 c_5 + \frac{1}{4} c_3 c_4 \right) h_i^8 + \\
 & \left. + \left(\frac{2}{9} c_3 c_5 + \frac{1}{9} c_4^2 \right) h_i^9 + \frac{1}{5} c_4 c_5 h_i^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h_i^{11} \right]_{h_1}^{h_2} \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

onde:

c_i = diâmetro comercial (cm) ou diâmetro correspondente a qualquer altura h_i , especificada ou comercial;

D = DAP (cm); h_i = altura comercial (m);

A estimativa volumétrica é requisito para o gerenciamento adequado de uma população florestal. Ahrens (1984) afirma que embora o crescente interesse pelo uso da biomassa como uma medida para se descrever a produção florestal, a determinação do volume total ou comercial de madeira certamente continua sendo a mais importante alternativa para uso prático. Sanquetta e Balninot (2004) reforçam a idéia que, em ecossistemas florestais, a maior fração da biomassa encontra-se no caule das árvores.

Além das variáveis utilizadas na estimativa volumétrica, há outras que auxiliam na análise da estrutura de dossel. A densidade foliar pode afetar diretamente a

penetrabilidade da radiação eletromagnética no dossel. Stumpf (1993) afirma que a estimativa de cobertura de dossel, além da avaliação da estrutura de copas, é fundamental para pesquisas com dados oriundos de sensores remotos. Afirma ainda que uma das características mais importantes utilizadas como indicador de *status* e condição do plantio florestal é a cobertura do dossel e estrutura de copas. Esta estimativa pode ser feita de muitas formas⁷, porém, segundo o mesmo autor, o densitômetro vertical apresenta vantagens relacionadas à operacionalidade e custos. A forma de mensuração desta variável se dá através de pontos amostrais, com somente duas classes: pontos projetados em folhas e pontos projetados em “não-folhas”, podendo ser céu, galhos, troncos, etc. Está expressa na equação 3.4.

$$Df = \frac{P_{folhas}}{P_{total}} \quad (3.4)$$

onde: D_f = Densidade Foliar; P_{folhas} = número de pontos com observação de folhas e P_{total} = número total de pontos amostrados

Schrender et al. (1993) afirma que a área de copa possui influência sobre a eficiência fotossintética e é fortemente correlacionada com o crescimento da árvore. As variáveis mais comumente medidas são: diâmetro ou largura de copa e altura ou profundidade de copa, visando derivar área e volume. A densidade foliar individual é utilizada como fator de cálculo da área de copa, tal como expresso na equação 3.5.

$$A_c = \left(\pi \cdot \frac{D_1}{2} \cdot \frac{D_2}{2}\right) \cdot Df \quad (3.5)$$

onde: A_c = Área de Copa; D_1 e D_2 = diâmetros medidos ortogonalmente

As variáveis dendrométricas estão relacionadas às variáveis topográficas e geodésicas. Couto (1984) salienta a importância da medida correta da área, uma vez que as

⁷ Fotografias, *scanners*, processamento de imagens e densitômetro esférico ou vertical

informações médias obtidas são extrapoladas por unidade de área (m³/ha). Uma alternativa é conhecer a quantidade de indivíduos, mas trata-se de uma informação muito sensível à extrapolação por unidade de área (SORRENTINO, 1986). Além da mensuração da unidade de área, o posicionamento correto das parcelas e transectos amostrais influenciam a análise de dados obtidos remotamente. Para precisões sub-métricas, é necessária a utilização de equipamentos geodésicos como estações totais ou teodolitos, devido às dificuldades de recepção das frequências GPS (Global Position System) sob o dossel florestal. Este é um grande ponto crítico da tecnologia de localização espacial, pois os receptores GPS requerem linha de visada clara. Em uma floresta densa, além da obstrução, há os problemas de multicaminhamento do sinal, limitando esta tecnologia. Jonas e Byrne (1999) comentam sobre as limitações do GPS em áreas florestais e o demasiado esforço de trabalho com estação total. Desta forma, a demanda por levantamentos topográficos e geodésicos em locais com relevo ondulado, soma-se ao inventário florestal tradicional.

Para auxiliar na avaliação das variáveis geodésicas, foi utilizado o RMS (*Root Mean Square*)⁸, expressa na equação 3.6.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3.6)$$

onde: N = População; x_i = valores individuais

O RMS é bastante útil para auxiliar nas validações a serem realizadas posteriormente.

⁸ Também conhecido como Valor Quadrático Médio

3.2 Materiais & Métodos

Procedimentos

A figura 3.2 ilustra o esquema metodológico para esta fase da pesquisa⁹, salientando que o objetivo de todos os levantamentos de campo foi obter referências para validações.

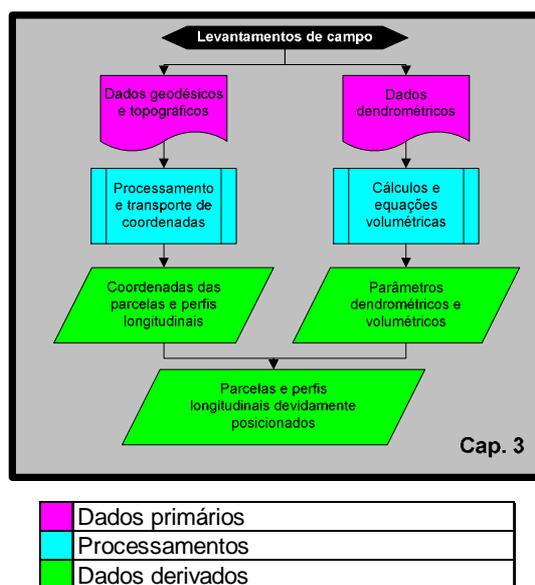


Figura 3.2 – Fluxograma de atividades relacionadas aos levantamentos de campo

Os dados primários (coletados diretamente) foram classificados em geodésicos (coordenadas XYZ), topográficos (diferença de nível e declividade) e dendrométricos (DAP, altura, diâmetros de copa, quantidade de árvores). Foram necessários alguns processamentos, tais como o transporte de coordenadas relativas para coordenadas absolutas, cálculo de cotas e de parâmetros dendrométricos, tais como área basal, densidade arbórea e volume. Após estes processamentos, foram gerados dados derivados, a serem utilizados como referência para as validações.

⁹ O esquema metodológico completo está anexado em A1.

Programas

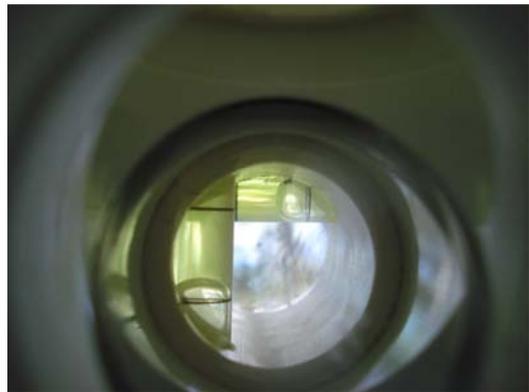
- Topcon Tools – Processamento de DGPS L1L2;
- Spectrum Survey Suíte 3.2 – Processamento de DGPS L1;
- Microsoft Office Excel 2003 – Tabulação e transporte de coordenadas.

Equipamentos¹⁰

- Hipsômetro Haaglof – Altura total;
- Densitômetro vertical – Abertura de dossel;
- Clinômetro digital BMI Incli Tronic Plus, com erro de 0,1° – Declividade;
- Nível óptico Sokkia C410 Automatic Level – Cálculo dos desníveis;
- Estação Total Topcon GPT 3003W, com precisão de 3” – Poligonal aberta;
- DGPS L1 Sokkia Stratus – Levantamento Estático (*rovers* e sub-base);
- DGPS L1L2 Topcon Hiper Lite – Levantamento Estático (base).

Na figura 3.3 é possível visualizá-los.

¹⁰ CAP e diâmetros de copa foram medidos com fita métrica e trena, respectivamente



A



B



C



D



E



F

Figura 3.3 – Equipamentos utilizados. A-detalhe do nivelamento do densitômetro vertical; B-clinômetro; C-nível óptico; D-estação total; E-DGPS L1; F-DGPS L2

Variáveis medidas

- Número de indivíduos arbóreos (un);
- CAP (cm);
- Altura total (m);
- Diâmetros de copa (m);
- Abertura de dossel (%);
- Declividade (°);
- Diferença de cota (m);
- Posição (X, Y, Z).

Quanto ao desenho e procedimento amostral para os dados dendrométricos, optou-se por parcelas retangulares, de 6x10 árvores. Como o espaçamento de plantio é 3x2m, as dimensões da parcela foram de 18x20m, totalizando 360m², aproximadamente. Foram medidos os perímetros das parcelas, contados e medidos o CAP de todos os indivíduos arbóreos contidos na parcela. Para as variáveis altura total, diâmetro de copa e densidade foliar, foram medidas apenas nas 10 primeiras árvores e 5 dominantes quanto à CAP. Utilizou-se a seguinte convenção de demarcação das árvores: inicia-se sempre no vértice esquerdo, alterando-se o sentido a cada linha de plantio. Por esta convenção, o vértice da parcela é sempre a árvore nº. 1 A figura 3.4 ilustra a parcela utilizada e a forma de enumeração das árvores.

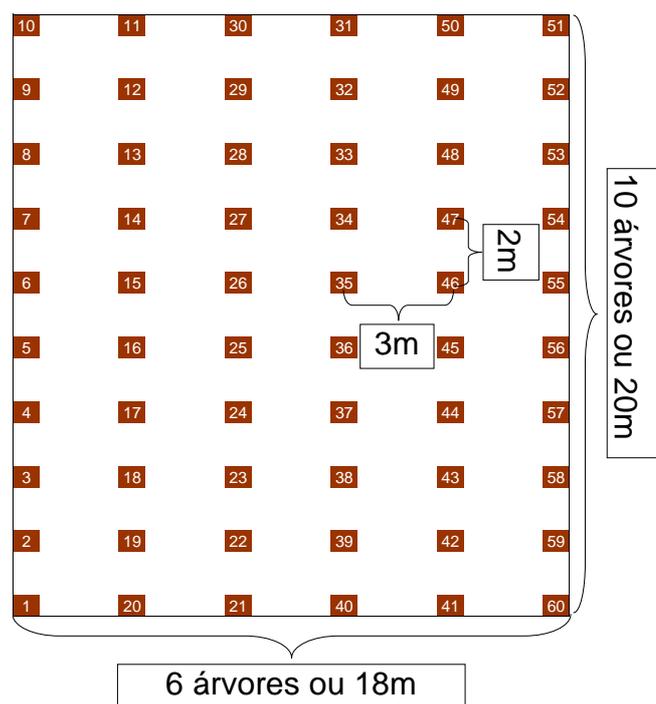


Figura 3.4 – Parcela utilizada e convenção para enumeração das árvores

Os protocolos de coleta de dados foram digitalizados, utilizando-se coletores eletrônicos, visando reduzir o erro proveniente de digitação. A determinação da altura foi efetuada empregando-se instrumentos denominados hipsômetros, dendrômetros, clinômetros ou relascópios, cujo funcionamento baseia-se em dois princípios fundamentais: princípios geométricos – relação entre triângulos semelhantes; e princípios trigonométricos – relação com triângulos retângulos (SPURR, 1952). O topo da árvore deve ser visível e a distância hipsômetro-árvore conhecida, fatos dificultados pelo espaçamento relativamente adensado (3x2m) e relevo ondulado. Os diâmetros de copa foram medidos na projeção vertical, com trena. A densidade foliar foi mensurada com densitômetro vertical, em que consiste em uma visada através de um ponto no centro do tubo, projetado ortogonalmente do terreno ao dossel. Optou-se por amostrar 4 pontos distintos por árvore, representando possíveis heterogeneidade na copa. Por não haver variação de espécies, o densitômetro vertical é indicado para este tipo de medida (KORHONEN et al., 2006; FIALA et al., 2006).

Na figura 3.5 podem ser visto o protocolo eletrônico de coleta de dados, mensurações do perímetro da parcela, CAP, altura total, diâmetro de copa e abertura de dossel.



A



B



C



D



E



F

Figura 3.5 – Coleta de dados dendrométricos. A-coletor eletrônico; B-CAP; C-área da parcela; D-diâmetro de copa; E- altura total; F-densidade foliar

Quanto ao desenho e procedimento amostrais para os perfis longitudinais, optou-se por transectos representativos de 4 situações distintas: i) sem cobertura arbórea e em nível; ii) sem cobertura arbórea e em desnível; iii) com cobertura arbórea e em nível e; iv) com cobertura arbórea e em desnível. Foram medidas a diferença de nível e declividade em cada ponto.

Para conhecer as coordenadas dos vértices das parcelas e dos perfis, foi realizada uma poligonal aberta¹¹ através de estação total até algum ponto com boa abertura – em geral, estradas ou pastagem na vizinhança. Nestes locais abertos, foram fixados 2 pontos DGPS (*rovers*) de 1 frequência para posterior cálculo de azimute e transporte de coordenadas absolutas para as coordenadas da estação total. Simultaneamente aos *rovers*, outro equipamento DGPS L1 foi fixado em um ponto de referência (sub-base). Posteriormente, esta coordenada sub-base foi corrigida a partir de um equipamento de dupla frequência utilizado como base, procedimento expresso na figura 3.6. Esta coordenada, por sua vez foi corrigida a partir da antena¹² da Escola Politécnica da USP (referência principal).



Figura 3.6 – Rastreamento simultâneo de L1L2 (Base) e L1 (Sub-base)

¹¹ Também chamada de Poligonal de Conexão

¹² Pertencente à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), coordenada pelo IBGE

Para o processamento de todas estas coordenadas, utilizou-se o método de ajustamento por propagação de erros, proposto por Gemael (1994). Todos estes erros (base + sub-base + rovers + estação total) são somados, resultando no erro final (WRIGHT, 1982). Este erro final deve ser compatível com as validações pretendidas. Stumpf (1993), afirma que a incompatibilidade entre a precisão posicional da parcela ou transecto amostral e a resolução de uma imagem, é a maior fonte de erro durante o processamento dos resultados. A tabela 3.1 ilustra a seqüência de processamento das coordenadas, utilizando 15° de mascara e valor 10 de DOP¹³.

Tabela 3.1 – Processamento das coordenadas

	Processo	Erro
1	Processamento da BASE (L1L2), utilizando a RBMC como referência	ERRO_BASE
2	Processamento da SUB-BASE (L1), utilizando a BASE como referência	ERRO_SUB-BASE
3	Processamento dos ROVERS (L1), utilizando a SUB-BASE como referência	ERRO_ROVER
4	Transporte de coordendas absolutas (ROVERS) para arbitrárias (ESTAÇÃO TOTAL)	ERRO_POLIGONAL
5	Propagação de erros	Σ

3.3 Discussão dos resultados

Optou-se pela distribuição aleatória nos 9 talhões, evitando-se proximidade com estradas e aceiros, visando minimizar o efeito de borda. Na figura 3.7 é possível visualizar as parcelas plotadas sobre uma fotografia aérea.

¹³ Dilution of Precision



Figura 3.7 – Localização das Parcelas

Foram medidas 20 parcelas em 28/05/08 (densidade foliar), 04/06/08 (área de copa) e 09/06/08 (restante das variáveis dendrométricas), com tamanho médio de 385,65m², totalizado 7.713m² - o que representa 0,53% da área de efetivo plantio. No total, foram 1.210 árvores amostradas. Quanto à densitometria, foram amostradas 284 árvores, somando 1.136 observações¹⁴. Por se tratar de uma distribuição binomial (FOLHA ou NÃO-FOLHA), 100 amostras já possuiriam suficiência estatística, com aceitação para 95% de intervalo de confiança. (STUMPF, 1993). A densidade foliar individual foi utilizada como fator no cálculo da área de copa. As principais variáveis dendrométricas medidas são relatadas na tabela 3.2.

¹⁴ Quatro observações por árvore

Tabela 3.2 – Variáveis dendrométricas ao nível de parcela

TALHÃO	ÁREA (ha)	IDADE (anos)	PARCELA	ÁREA_PARCELA (m ²)	NCOVAS /ha	NFUSTES /ha	DAPMÉDIO (cm)	ALTURA (m)	FALHAS/ha (%)	MORTAS/ha (%)	QUEBRADAS/ha (%)	COBERTURA (%)	Área de Copa (m ²)
1	22,04	4,06	1	395,60	1517,00	1517,00	14,19	21,15	0,00	0,00	0,00	61,54	5,31
			10	363,81	1649,00	1649,00	13,11	21,15	0,00	0,00	1,67	66,67	6,77
			11	361,92	1658,00	1630,00	14,48	21,26	1,67	1,69	0,00	65,00	4,97
2	25,72	4,07	2	390,60	1536,00	1485,00	14,04	24,90	5,00	0,00	0,00	69,23	6,84
			12	387,45	1549,00	1574,00	14,39	22,12	1,67	0,00	1,64	69,64	6,84
			3	383,25	1566,00	1566,00	14,31	22,62	0,00	0,00	1,67	76,67	6,86
3	23,15	4,07	13	388,24	1545,00	1520,00	14,96	23,32	1,67	1,69	0,00	76,79	5,48
			14	387,66	1548,00	1599,00	13,22	19,45	0,00	0,00	0,00	75,00	7,19
			15	417,36	1438,00	1414,00	15,18	21,97	1,67	0,00	3,39	73,33	5,75
			4	384,56	1560,00	1560,00	13,89	20,49	3,33	0,00	1,67	71,43	5,39
5	6,20	4,04	5	372,13	1612,00	1585,00	13,75	22,19	1,67	0,00	0,00	67,86	7,14
			6	382,95	1567,00	1567,00	13,51	22,90	1,67	0,00	0,00	61,67	4,65
6	19,38	4,03	17	371,85	1614,00	1533,00	13,44	21,09	5,00	3,51	3,51	75,00	6,49
			7	364,00	1648,00	1648,00	13,77	22,05	0,00	0,00	0,00	80,00	7,56
7	27,03	4,04	18	366,00	1639,00	1585,00	13,73	21,41	5,00	1,72	6,90	68,33	5,58
			19	367,20	1634,00	1634,00	13,74	22,65	0,00	1,67	0,00	71,43	3,69
			21	409,92	1464,00	1464,00	14,17	23,24	1,67	0,00	0,00	76,92	1,86
8	10,48	4,06	8	421,80	1422,00	1351,00	14,65	23,49	5,00	0,00	0,00	75,00	6,50
			20	422,73	1419,00	1419,00	14,87	23,74	0,00	0,00	0,00	76,79	1,63
9	3,89	4,03	9	374,00	1604,00	1578,00	13,06	22,64	1,67	0,00	0,00	85,71	4,79
TOTAL / MÉDIA	145,54	4,05	20	7713,03	1559,45	1543,90	14,02	22,19	1,83	0,51	1,02	72,20	5,56

A diferença entre o número de covas por ha (NCOVAS) e o número de fustes por ha (NFUSTES) é explicada em parte pelo percentual de falhas. Isso, pelo fato de que árvores bifurcadas abaixo de 1,3m são contabilizadas como 2 fustes. O somatório de falhas, mortalidade e quebra (3,37%) expressa o distanciamento entre a condição real e o potencial em termos de quantidade de indivíduos arbóreos saudáveis e produtivos. A média para DAP, Altura Total e Área de Copa foram 14,02cm, 22,19m e 5,56m², valores satisfatórios para a idade do povoamento. Um resultado interessante é a cobertura foliar, em torno de 72,2%, considerada um dossel fechado, fato perceptível pelo sombreamento no interior dos talhões. Wagner (1995) considera este percentual como baixa penetrabilidade.

A figura 3.8 ilustra as distribuições diamétrica e hipsométrica, evidenciando típicas distribuições de povoamentos florestais clonais, com distribuição normal para DAP e relativa homogeneização de altura, variável fortemente influenciada pelo material genético.

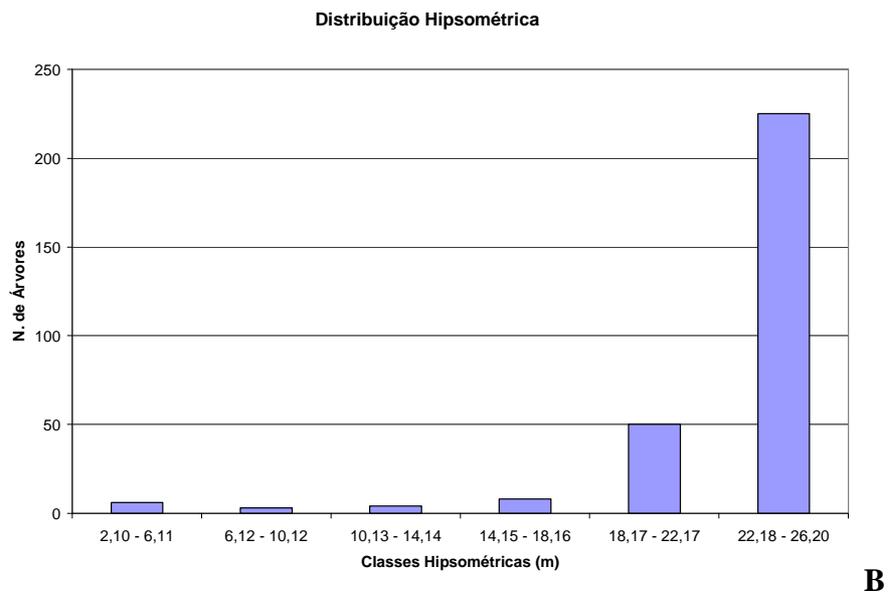
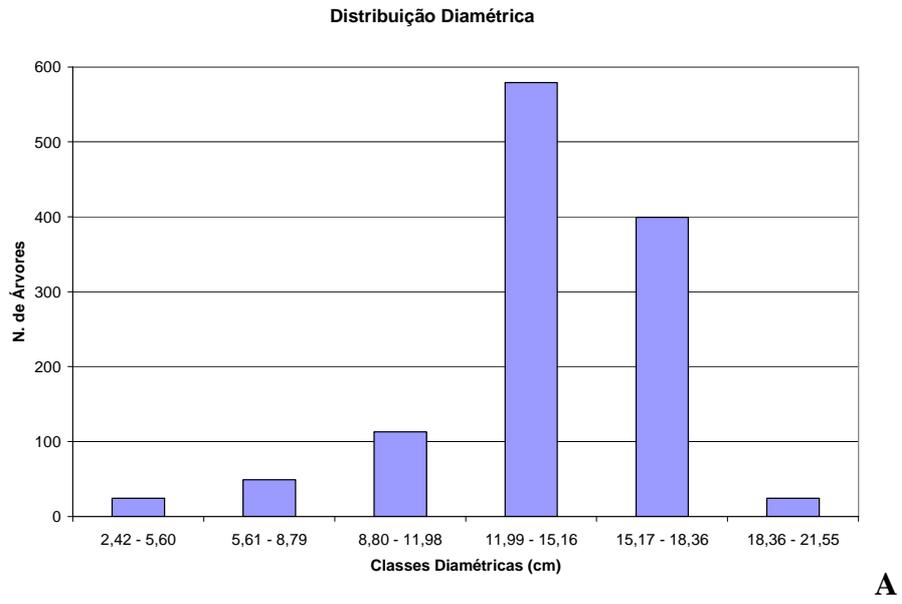


Figura 3.8 – Distribuições diamétrica (A) e hipsométrica (B)

As relações empíricas entre as principais variáveis dendrométricas estão expressas na figura 3.9.

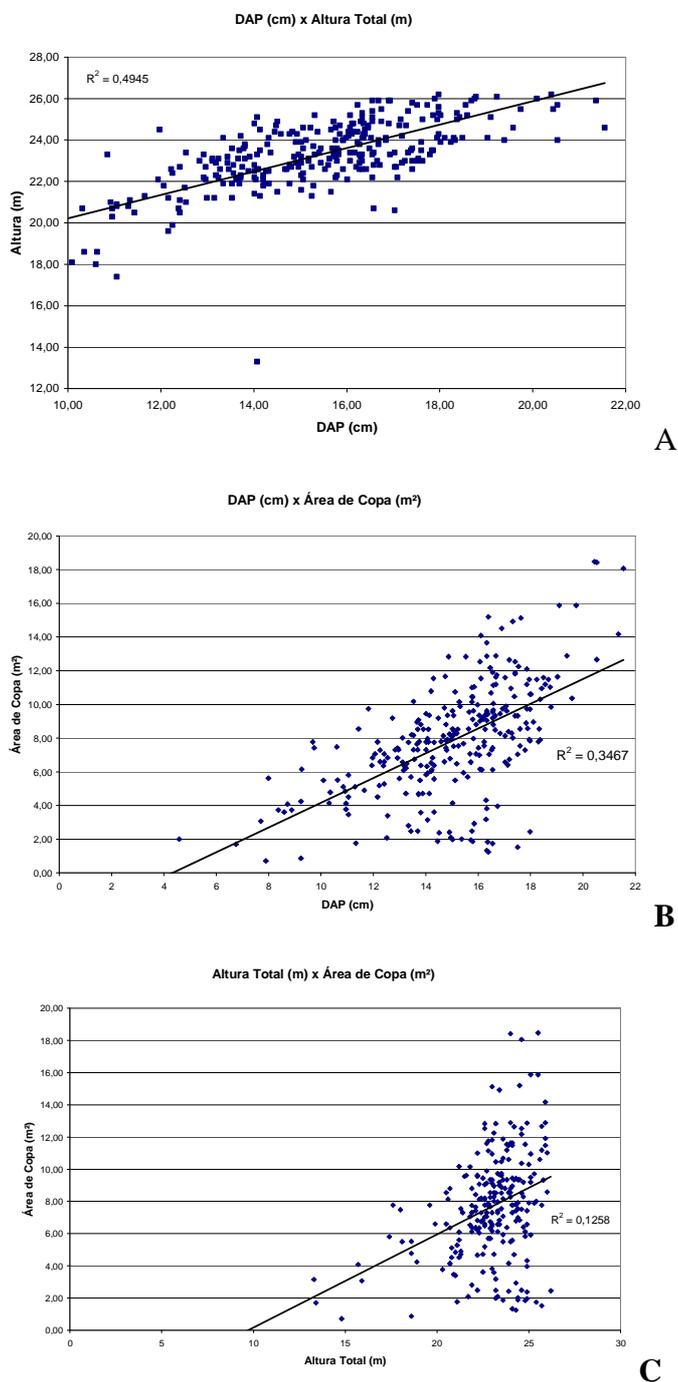


Figura 3.9 – Relações empíricas entre as principais variáveis dendrométricas. A-DAP(cm) x altura(m); B-DAP(cm) x área de copa (m²); C-altura(m) x área de copa (m²)

As relações empíricas encontradas foram consideradas aquém do esperado, principalmente a relação entre DAP e Altura Total. O fato de o povoamento ser clonal evidencia que o comportamento do DAP (variável mais influenciada por características ambientais) não acompanha o comportamento da altura (variável mais influenciada por características genóticas).

Foram calculadas a área basal (G) e o volume total com casca (VTCC), expressos na tabela 3.3

Tabela 3.3 – Área basal e volume total com casca

TALHÃO	ÁREA (ha)	DATAPLANTIO	PARCELA	AREA_PARCELA (m ²)	G [m ² /ha]	VTCC [m ³ /ha]
1	22,04	17/05/2004	1	395,60	24,55	226,41
			10	363,81	23,19	219,61
			11	361,92	27,60	257,28
2	25,72	13/05/2004	2	390,60	24,85	265,48
			12	387,45	27,25	273,76
3	23,15	15/05/2004	3	383,25	26,08	261,83
			13	388,24	27,77	287,13
			14	387,66	24,60	229,74
			15	417,36	26,33	257,00
4	7,65	07/05/2004	4	384,56	25,44	243,22
5	6,20	27/05/2004	5	372,13	24,64	244,80
6	19,38	28/05/2004	6	382,95	22,92	228,06
			17	371,85	22,37	207,75
7	27,03	25/05/2004	7	364,00	24,71	233,55
			18	366,00	23,93	227,91
			19	367,20	24,73	243,42
			21	409,92	23,48	236,74
8	10,48	19/05/2004	8	421,80	22,96	230,73
			20	422,73	24,95	256,42
9	3,89	28/05/2004	9	374,00	21,77	217,61
TOTAL / MÉDIA	145,54		20	7713,03	24,71	242,42

A média para esta fazenda é de 24,71m²/ha de Área Basal e 242,42m³/ha de volume total com casca, compatíveis com uma IMA¹⁵ de 60m³/ha.ano⁻¹, satisfatório para o povoamento em questão.

O levantamento dos perfis longitudinais foi realizado durante o período de 04 a 10 de junho de 2008. Foram implantados 170 pontos de apoio (piquetes de madeira), sendo os dois primeiros correspondentes a pontos de apoio DGPS, ou seja, com coordenadas absolutas conhecidas. Na figura 3.10 é possível visualizar a localização dos perfis.



Figura 3.10 – Localização dos perfis topográficos

Para os perfis 1 e 3 (em nível), foram cotados pontos a cada 10m. Já para os perfis 2 e 4 (desnível), houve a necessidade de cotar pontos a cada 2,5m, devido à impossibilidade de se realizar visada morro acima no ponto inicial da régua topográfica, tal como pode

¹⁵ Incremento Médio Anual

ser visto na figura 3.11. O cálculo de cotas utilizou a abordagem de Veras (1997) como referência.



Figura 3.11 – Pontos cotados a cada 2,5m

Considerando os comentários de Jonas e Byrne (1999) sobre a influência negativa da presença de sub-bosque herbáceo na acurácia da modelagem de terreno, todos os perfis foram alocados em áreas sem a presença deste tipo de vegetação, restando apenas a declividade e a cobertura florestal como variáveis que possam influenciar significativamente.

A tabela 3.4 expressa as medidas dos perfis longitudinais. A alta variação na declividade medida nos pontos cotados indica a relevância das características presentes em detalhes da escala fina de análise (micro-relevo), mostrando que a acurácia posicional planimétrica influencia na acurácia posicional altimétrica, característica agravada pelo fato de existir pequenas variações, tais como troncos e galhos caídos, buracos, sulcos e voçorocas que podem comprometer a comparação entre os dados de campo e o MDT.

Tabela 3.4 – Medidas dos perfis longitudinais

Perfil	Comprimento (m)	Desnível (m)	Declividade (°)		
			Média	Máxima	Mínima
Sem cobertura, em nível	90,00	-6,69	3,93	5,50	1,70
Sem cobertura, em desnível	137,50	-66,89	19,19	31,10	2,00
Com cobertura, em nível	100,00	16,89	5,30	9,80	0,70
Com cobertura, em desnível	87,50	-47,00	18,25	27,80	6,80

Os levantamentos com estação total e DGPS foram realizados no período 11-17/06/2008 e 18-30/06/2008, respectivamente. As coordenadas dos vértices das parcelas e dos perfis foram devidamente transportadas através de cálculo de azimutes de cada ponto. O erro planimétrico médio da coordenada do vértice da parcela foi de 0,12m e o altimétrico foi de 0,21m, compatíveis com as validações posteriores. A tabela 3.5 mostra os erros em cada fase do processamento, utilizando a média dos erros de todos os ROVERS para as linhas 3 e 4, ou seja: somam-se os erros dos processamentos da BASE, SUB-BASE, ROVER e transporte de coordenadas da estação total.

Tabela 3.5 – Propagação de erros para os vértices das parcelas e perfis longitudinais

Processo	Erro Planimétrico (m)	Erro Altimétrico (m)	RMS (m)
1 Processamento da BASE (L1L2), utilizando a RBMC como referência	0,001	0,003	0,003
2 Processamento da SUB-BASE (L1), utilizando a BASE como referência	0,002	0,004	0,004
3 Processamento dos ROVERS (L1), utilizando a SUB-BASE como referência	0,006	0,014	0,013
4 Transporte de coordenadas absolutas (ROVERS) para arbitrarias (ESTAÇÃO TOTAL)	0,110	0,190	0,200
5 Propagação de erros	0,119	0,211	0,220

Considerações Finais

Os levantamentos de campo tiveram como principal finalidade obter dados de referência para as comparações e validações com resultados derivados do *laserscanner*, com precisão posicional final de 0,12m nas coordenadas X e Y e 0,21m em Z, compatíveis com as características dos produtos a serem validados.

4. AEROLEVANTAMENTO E GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DERIVADOS DE DADOS LASER

Neste capítulo estão documentados todos os tópicos referentes ao aerolevanteamento e à geração dos modelos digitais de superfície, terreno e altura (MDS, MDT e MDA, respectivamente), além das imagens de intensidade e hipsometria envolvendo a fundamentação teórica, procedimentos metodológicos e discussão dos resultados.

4.1 Fundamentação

Este tópico trata dos conceitos teóricos que são essenciais ao entendimento do capítulo. São abordados temas como princípios do LASER (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation) e dos sensores que o utilizam, filtros e técnicas para geração de modelos digitais.

O LASER reúne mecanismos que amplificam a luz pelo processo da emissão estimulada (SMITH e SOROKIN, 1966). Seu princípio já era conhecido desde 1917, quando Einstein, com a publicação de um postulado sobre fótons, provou que a emissão estimulada era possível. Um maior impulso no caminho de sua descoberta só veio ocorrer após a Segunda Guerra Mundial, no final da década de 1950, quando foram intensificadas as pesquisas com MASER (*Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) e RaDAR (*RADio Detection And Ranging*) (LENGYEL, 1962). Em 1954, o físico americano C.H. Townes desenvolveu o primeiro MASER. Em 1958, ele e A. L. Schawlow publicaram um artigo sobre a possibilidade de um raio LASER no espectro visível e infravermelho (WEHR et al, 1999).

O primeiro LASER foi desenvolvido em 1960 pelo físico americano T.H. Maiman, utilizando um cristal de rubi. Foi denominado MASER Óptico, mas posteriormente denominado como LASER (LEVINE et al., 1966; CANDREVA et al., 1983; ROSE, 1995). A emissão estimulada é a indução de emissão de energia externamente em um sistema excitado, gerando o efeito de amplificação. Uma fonte externa gera energia e,

após a absorção da radiação, o sistema passa a um estado excitado onde pode liberar energia sob a forma de radiação eletromagnética. (SVELTO e HANNA, 1976). A figura 4.1 ilustra o princípio de funcionamento de um LASER.

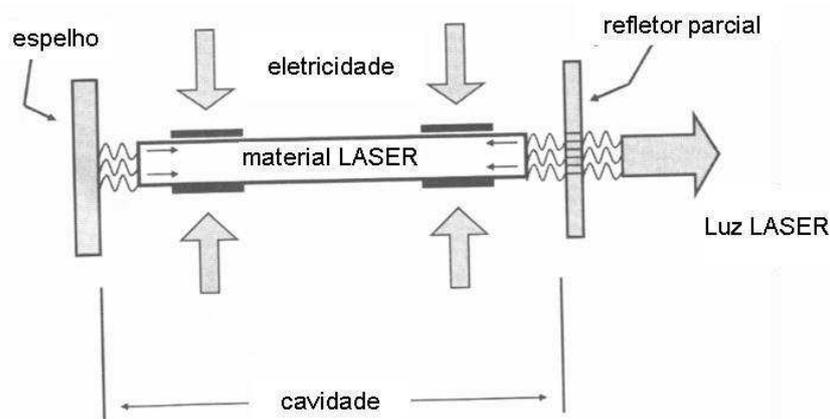


Figura 4.1 – Princípio de funcionamento de um LASER

Fonte: STITCH (1979)

Segundo Svelto e Hanna (1976), o feixe LASER possui as seguintes propriedades:

- Direcionalidade – Conseqüência direta do fato de que o meio ativo é colocado em uma cavidade ressonante;
- Monocromaticidade – somente uma freqüência de onda pode ser amplificada;
- Pulsos de curta duração (1ns) – Propriedade fundamental para aplicações de medições de distancia (LENGYEL, 1962);
- Coerência – Vibrações em fase uma com a outra. Raios paralelos de luz. De acordo com Lengyel (1962), esta é a característica mais importante para se obter precisão em medições. A figura 4.2 exemplifica uma onda não-coerente (acima) de uma onda coerente (abaixo).

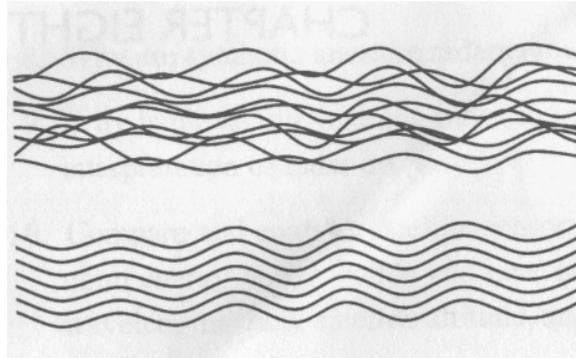


Figura 4.2 – Diferenciação entre onda não-coerente (acima) e coerente (abaixo)

Fonte: SVELTO e HANNA (1976)

Young e MacAdam (1977) afirmam que é desejável que a fonte de luz seja completamente coerente, no sentido de que nenhuma interferência prejudique a qualidade. A coerência aprimora a acurácia e precisão na detecção.

Segundo Allen (1969), a amplitude de comprimento de onda da oscilação LASER está entre o quartzo ultravioleta às ondas sub-milimétricas. A potência resultante está entre uma fração de *miliwatt* à dezenas de *megawatts*. A figura 4.3 ilustra a região espectral utilizada pelas tecnologias de emissão e detecção de energia eletromagnética.

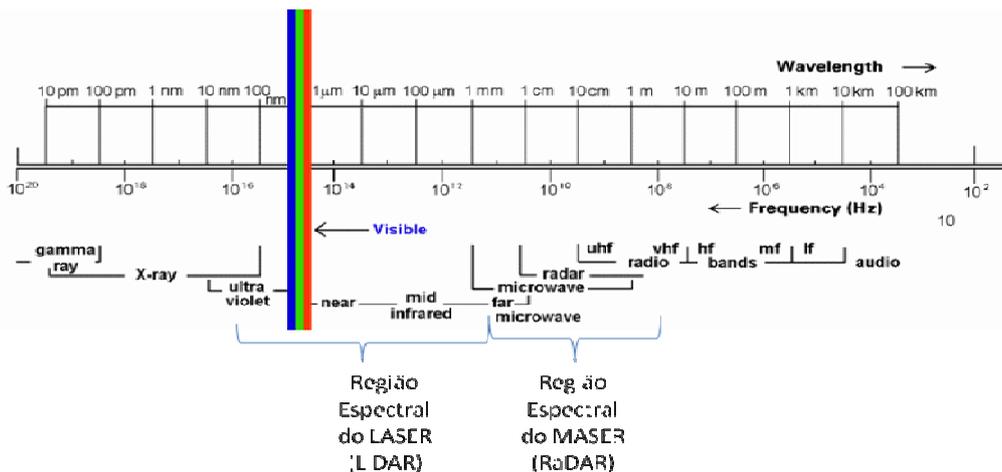


Figura 4.3 – Regiões espectrais utilizadas por LASER e MASER

Fonte: Adaptada de LILLESAND e KIEFER (1994)

O pulso LASER pode ser gerado a partir de materiais gasosos, tais como luz de tubos de xenônio, lâmpadas de vapor ou sólidos, tais como cristais e diodos especialmente desenvolvidos, como o Nd:YAG (Neodymium:Yttrium-Aluminum-Garnet; $Y_3Al_5O_{12}$), com pulsos de 10–15 ns e geração de energia na faixa do infravermelho próximo. Segundo Measures (1984), este material apresenta vantagens relacionadas à precisão e controle. A maioria dos sistemas opera numa faixa do espectro eletromagnético entre 800-1.600nm, utilizando suas propriedades físicas, tais como: alta potência, pulsos curtos de alta energia e espectro óptico estreito. (BALTSAVIAS, 1999a; WEHR e LOHR, 1999). Behera e Roy (2002) salientam que, em aplicações florestais, a faixa mais indicada é de 900-1.064nm, devido ao grande retroespalhamento da vegetação e alta transmitância atmosférica, tal como pode ser visto na figura 4.4. Lewis e Hancock (2007) acrescentam a aplicabilidade de detecção na região do SWIR¹⁶, até 1600nm.

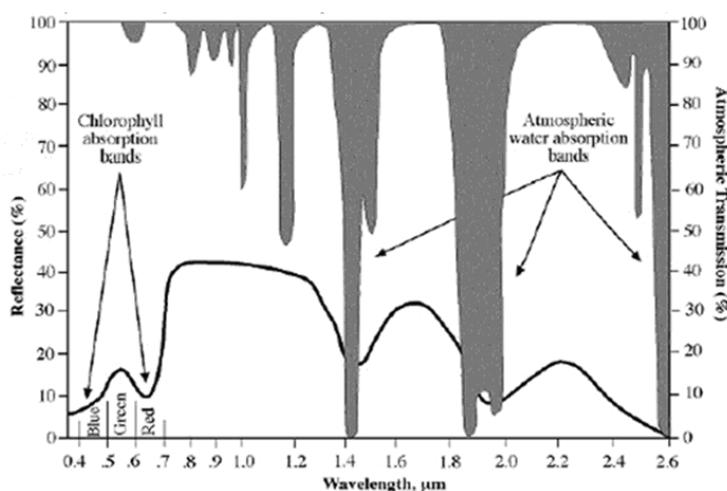


Figura 4.4 – Retroespalhamento da vegetação e transmitância atmosférica para diversas regiões do espectro eletromagnético

Fonte: Adaptada de LILLESAND e KIEFER (1994)

¹⁶ Short Wave Infra Red

A tecnologia LASER foi incorporada em muitos equipamentos, dentre eles, distanciômetros. Independentemente no nível de aquisição de dados (terrestre, aérea ou orbital), o sistema possui sua própria fonte de energia e pode ser operado em ondas contínuas ou modo de pulso. A figura 4.5 diferencia as duas formas. Em A), o sistema utiliza o tempo para medir a diferença entre emissão e detecção. Como a velocidade da luz é conhecida, a distância é calculada através da diferença de tempo entre a emissão e o retorno. Em B), o sistema utiliza a fase para medir a diferença entre emissão e detecção.

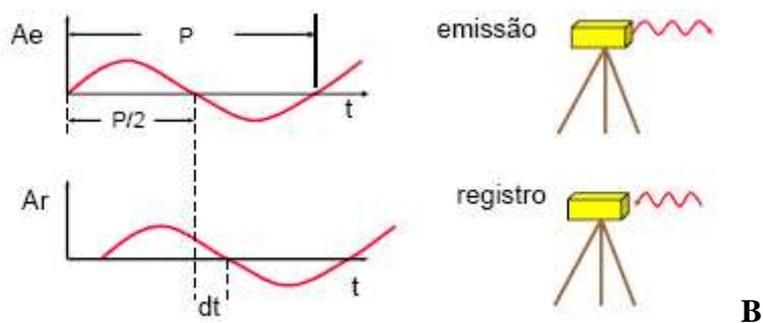
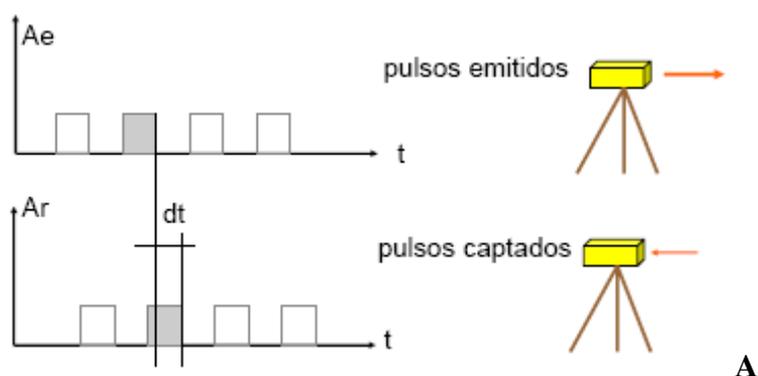


Figura 4.5 – Sistemas de medição da diferença entre emissão e detecção. A) Pulso ou Discreto e B) Fase ou Contínuo ou *Waveform*

Fonte: CENTENO (2003)

Para os sistemas de pulsos (ou discretos), a distância pode ser calculada através da seguinte equação (REES, 1990; DALMOLIN e SANTOS, 2003):

$$R = c \cdot \left(\frac{dt}{2} \right) \quad (4.1)$$

Onde: R =distância; dt =tempo entre emissão e recepção de um pulso

O feixe LASER possui um pequeno ângulo de divergência, ou seja, ele se abre muito pouco após deixar a fonte (SCHMIDT et al., 2007). Devido à divergência, mesmo sendo pequena, sua projeção na superfície não é pontual, mas forma uma superfície circular ou elíptica, conhecida como *footprint* (F), que pode ser calculado através da equação 4.2:

$$F = 2.h.\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

(4.2)

Onde: F =Footprint; h =altura de vôo; γ =ângulo de divergência do pulso, em radianos

Uma consequência importante do *footprint* é a detecção de mais de um alvo simultaneamente em um mesmo feixe, originando retornos distintos (LÖHR e EIBERT, 1999). A figura 4.6 ilustra este conceito e o efeito na interação com alvos tridimensionais.

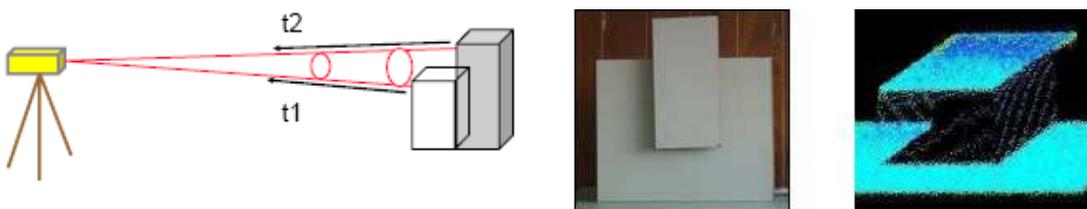


Figura 4.6 – *Footprint* e suas consequências em alvos tridimensionais

Fonte: CENTENO (2003)

O diâmetro do feixe terá um efeito muito importante em aplicações florestais. Em geral, sistemas com *footprints* grandes (feixes largos), utilizam o princípio de fase ou onda contínua (*waveform*) (LIM et al, 2003). Sistemas com *footprints* pequenos (feixes

estreitos), utilizam o princípio de pulsos (discretizados), adotando-se o tempo como fator fundamental à medição de distância.

Sistemas de feixes estreitos não são otimizados para análise de estrutura florestal por haver a probabilidade de não-amostragem dos topos das árvores e de serem completamente espalhados pela vegetação (principalmente espécie de folhas largas). Conseqüentemente haverá subestimativa da altura das árvores (DUBAYAH e DRAKE, 2000; ZIMBLE et al, 2003; LEWIS e HANCOCK, 2007). Apesar das desvantagens dos *footprints* estreitos para a área florestal, Behera e Roy (2002) salientam a ausência de sensores de feixes largos no meio comercial.

Por ser uma área projetada no terreno, pode haver variação de elevação dentro do *footprint*. Através do registro de múltiplos retornos, torna-se possível medir estas variações. Desta forma, o ponto mais próximo ocasionará um pulso que retorna mais rapidamente e o ponto mais distante, um retorno mais demorado. Essa característica ganha relevância quando se leva em consideração a diferença de penetração que pode existir em um único pulso (BEHAN, 2000). Nos sistemas discretos, a quantidade de registros de pulsos de retornos pode variar, geralmente de 2 a 5. A figura 4.7 expressa os diferentes retornos em uma cobertura florestal, tais como os primeiros retornos representando a copa e os últimos representando o terreno.



Figura 4.7 – Registro de diferentes retornos em uma cobertura florestal

Todo sistema possui uma unidade medidora (com o emissor e o receptor) e uma unidade de controle e processamento. De acordo com Wehr e Lohr (1999), são montados de forma que a emissão e a detecção percorram o mesmo caminho óptico, fazendo com que todo objeto iluminado esteja contido em seu campo de visada. Se o sistema possuir algum mecanismo de varredura, haverá também um *scanner* óptico-mecânico – um *laserscanner* propriamente dito. Distanciômetros sem varredura são conhecidos como perfilômetros (níveis aéreo e orbital) ou trenas (nível terrestre). A figura 4.8 diferencia os dois sistemas.

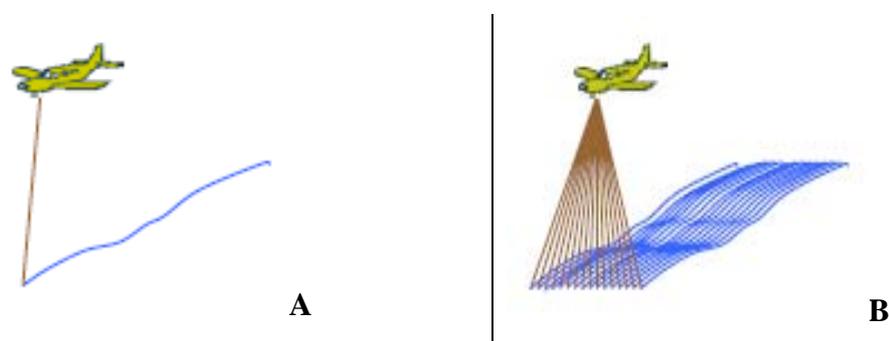


Figura 4.8 – Tipos de varredura. A) perfilômetro (ausência de scanner); B) *laserscanner*

Podem utilizar espelhos de varredura óptico-mecânica (*wiskbroom*) ou arranjo de fibras ópticas (*pushbroom*). A forma de funcionamento dos espelhos influencia diretamente o tipo de varredura no terreno. A figura 4.9 relaciona alguns tipos de espelhos com a varredura ocorrida no terreno: (A) varredura bidirecional “zigue-zague” ou Z-Scan, provocada pelo espelho oscilante e utilizada pelos sistemas ALTM (Airborne Laser Terrain Mapper), ALS (Airborne LaserScanner) e Top-Eye; (B) varredura unidirecional paralela ou Line-Scan, provocada pelo espelho de polígono de rotação e; (C) varredura elíptica, provocada pelo espelho rotacional (Palmer) e utilizada pelo sistema Falcon Toposys. Importante ressaltar que o padrão de varredura no terreno também é influenciado pela direção e velocidade de voo e pelo relevo.

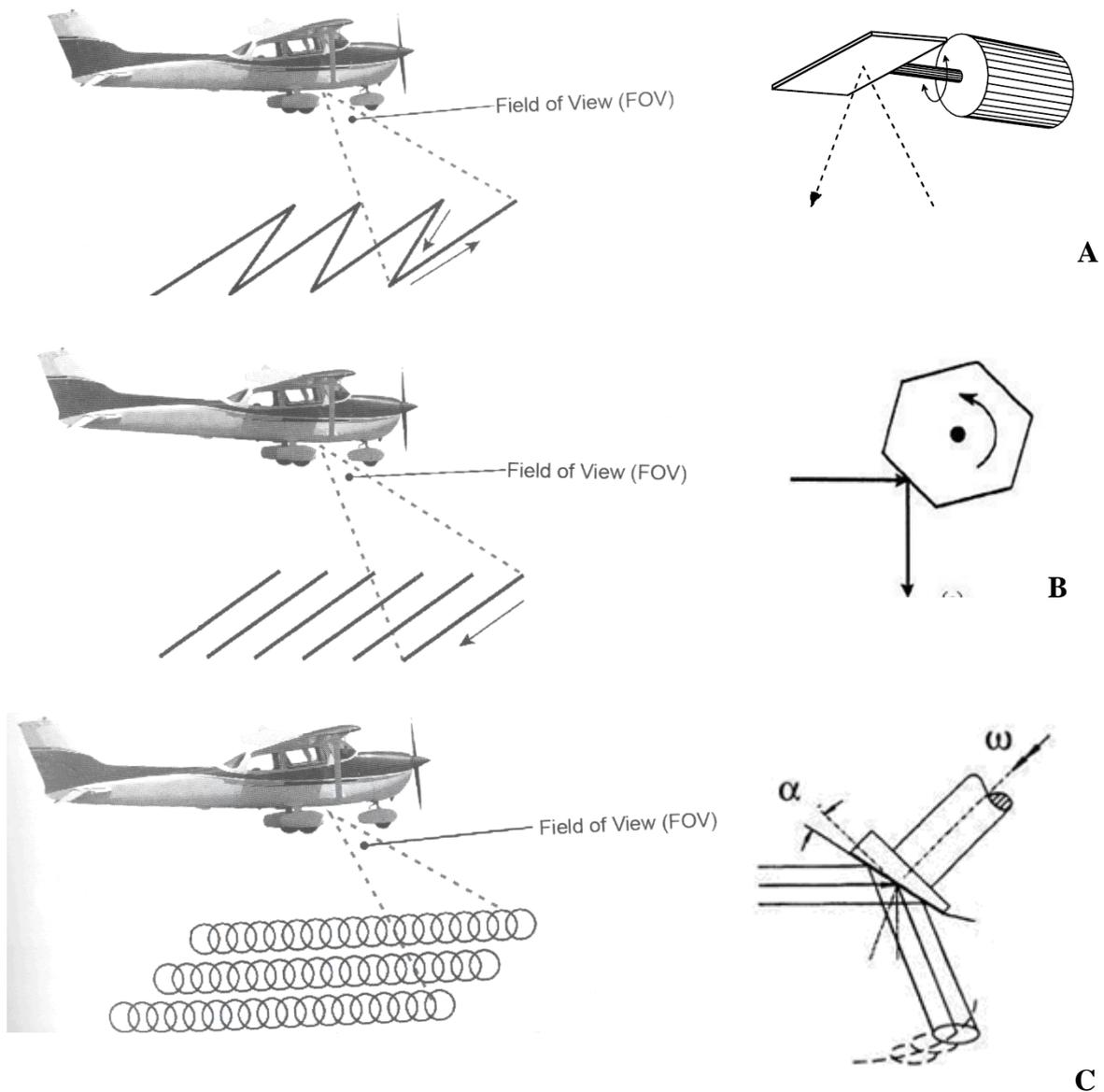


Figura 4.9 – Relação entre espelhos e padrão de varredura no terreno. A) varredura bidirecional “zig-zague” ou Z-Scan, provocada pelo espelho oscilante e utilizada pelos sistemas ALTM, ALS e Top-Eye; B) varredura unidirecional paralela ou Line-Scan, provocada pelo espelho de polígono de rotação e; C) varredura elíptica, provocada pelo espelho rotacional utilizada pelo sistema Falcon TopoSys

Fonte: Adaptada de MATHER (2004)

A varredura é feita no sentido transversal à direção da linha de vôo, com a abertura configurável pelo sistema, formando a largura da faixa abrangida. O movimento da

aeronave permite a cobertura na direção da linha de vôo. A figura 4.10 ilustra o conceito e a equação 4.3, a forma de se calculá-la.

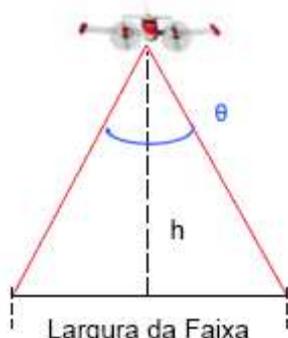


Figura 4.10 – Esquema representativo da largura de faixa

$$L = 2.h.\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4.3)$$

Onde: L =largura de faixa; h =altura de vôo; θ =ângulo de varredura, em radianos

O ângulo de varredura é um parâmetro configurável. Dalmolin e Santos (2003) citam que ângulos menores são utilizados para aplicações específicas, tais como levantamentos de detecção de cabos de linha de transmissão e para melhor penetração na vegetação.

Outro parâmetro também relacionado com o tipo de varredura é a densidade de pontos, ou seja, a quantidade de pontos por unidade de área. É dependente da velocidade de vôo e da potência do equipamento e influencia diretamente o tamanho da célula das grades dos modelos (equivalente ao tamanho de *pixel*). Dependendo do tipo de varredura, pode ser homogêneo ou não. De acordo com Wiechert (2004), o espelho oscilante possui algumas desvantagens, tais como a necessidade de calibração regularmente e os erros adicionais relacionados à aceleração mecânica, padrão heterogêneo de varredura no terreno, principalmente na região de sobreposição de faixas, tal como ilustrado na figura 4.11. Temba e Philips (2007) avaliaram a acurácia na sobreposição lateral entre as faixas contíguas e obtiveram resultados preliminares entre 0,53 e 0,97m no vertical,

valores piores que o esperado, chamados de discrepância vertical. Schnadt e Katzenbeißer (2005) afirmam que este tipo de amostragem sem vizinhança impossibilita a análise de contexto, porém comentam sobre o benefício de ajustamento flexível para o ângulo de visada desejado.

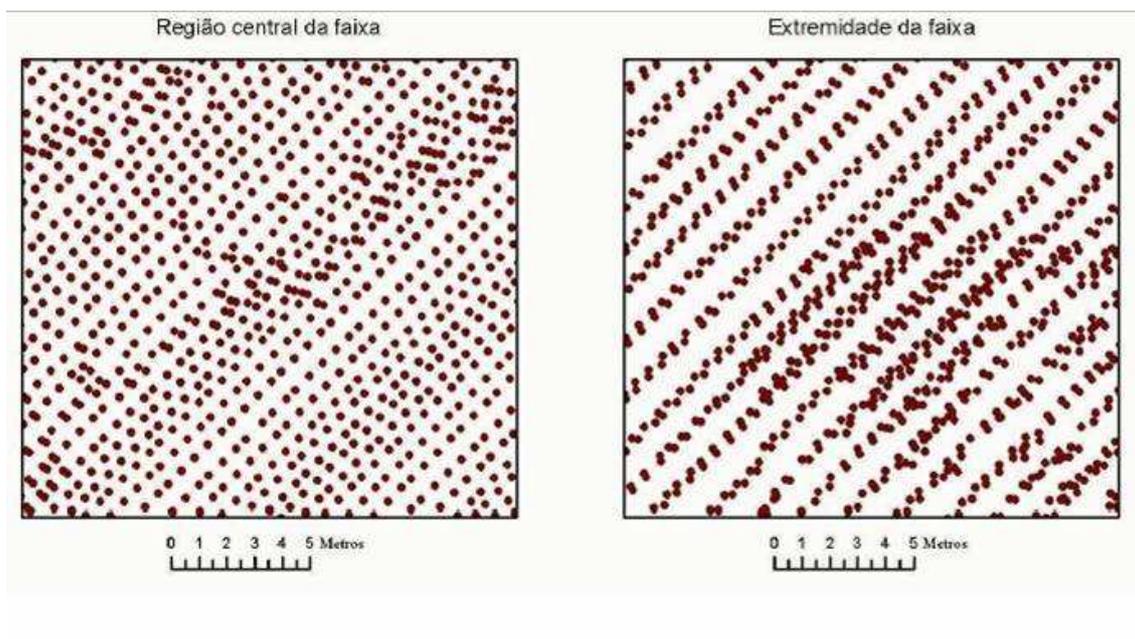


Figura 4.11 – Padrão heterogêneo de varredura do espelho oscilante

Fonte: ZANDONÁ (2006)

Para haver controle posicional (coordenadas tridimensionais), são necessários sistemas de apoio (BALTSAVIAS, 1999a). Segundo Dalmolin e Santos (2003), a posição planimétrica é obtida com o auxílio de um sistema de posicionamento com precisão compatível. A posição do sensor no momento da medição de cada ponto é determinada mediante um DGPS, que fornece as coordenadas planimétricas de cada ponto com acurácia de 5-15cm. A correção diferencial é para corrigir em tempo real a trajetória da aeronave durante a realização do vôo. Outro receptor posicionado no solo (com raio de até 50km de distância) provê a correção diferencial em tempo real para um alinhamento

da aeronave mais preciso. Um segundo sistema de apoio é o Sistema de Medição Inercial (SMI), encarregado de registrar a inclinação (arfagem, guinada e rolamento¹⁷), auxiliando na determinação das coordenadas XYZ. A figura 4.12 ilustra os efeitos presentes na atitude da aeronave.



Figura 4.12 – Movimentos de deriva que ocorrem durante o voo

Fonte: <http://www.aerodesign.ufsc.br/teoria/periodicos/voarbem.pdf>

O SMI consiste em um par de giroscópios (no mínimo), um orientado na vertical e outro na horizontal; e um acelerômetro, para medir a velocidade dos efeitos. Com estes aparelhos, é possível medir a diferença de posição em relação a uma referência. Ele fornece os ângulos de atitude da aeronave para cada ponto determinado no terreno computando a direção dos pulsos (FOWLER, 2000). Segundo Sallem Filho e Bonatto (2004), seus parâmetros de saída são: data/hora, latitude, longitude, velocidade, valores das componentes posicionais.

A junção dos três sub-sistemas (SMI, DGPS e *Laserscanner* propriamente dito) formam o sistema conhecido como LiDAR (Light Detection and Ranging) ou LaDAR (Laser

¹⁷ Pitch, Yaw e Roll ou ω , φ , κ

Detection and Ranging). A figura 4.13 ilustra o sistema completo. Não existe uma terminologia oficial. Baltasvias (1999b) recomenda a utilização do termo LaDAR por deixar claro a utilização de um tipo muito especial de luz, que é o LASER. Porém, como não há sensores opticamente ativos que utilizam outro tipo de luz, o termo LiDAR vem sendo mais utilizado nas publicações. Os termos ALS (*Leica Geosystems*), ALSM (Airborne Laser Swath Mapping) e ALTM (*Optech Inc.*) são registrados pelos fabricantes (nomes comerciais). Para Rees (1990), os *laserscanners* podem ser classificados em *Scattering* – se o interesse for a intensidade/força do sinal de retorno – ou *Ranging* – se o interesse estiver no intervalo de tempo entre a transmissão e a recepção do sinal.

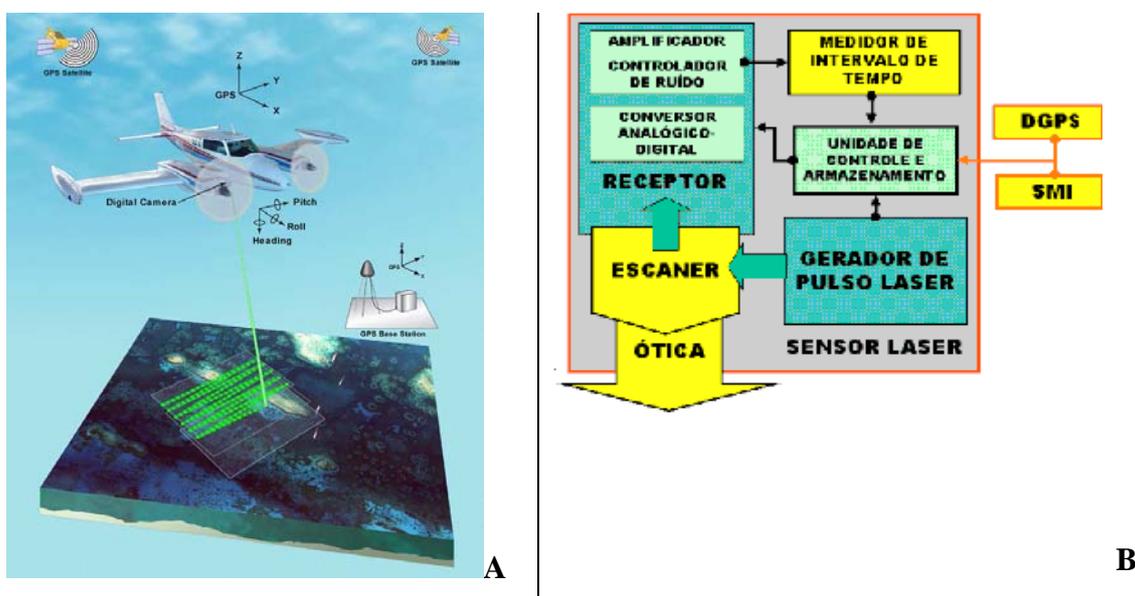


Figura 4.13 – Sistemas LiDAR e seus subsistemas

Fonte: A) <http://coastal.er.usgs.gov/hurricanes/ivan/lidar/eaarl-schematic.jpg>. B) MITISHITA, apresentação de aula, 2007

Os dados provenientes do SMI e DGPS são medidos e armazenados simultânea e paralelamente à medição da distância, devendo haver sincronismo entre SMI, DGPS e *laserscanner*. Centeno (2003) comenta que os subsistemas coletam dados em intervalos diferentes, logo, muitos valores devem ser interpolados, utilizando-se filtro de Kalman, geralmente.

De acordo com Baltsavias (1999b), a acurácia da posição do pulso depende principalmente da qualidade do pós-processamento DGPS, bem como do receptor e distância entre as estações-bases, da integração entre todos os componentes do sistema. O efeito dos erros de atitude aumenta com a altura de vôo e com o ângulo de varredura do sistema. A equação 4.4 estabelece a tolerância aceitável para a qualidade planimétrica.

$$Ep = \frac{h}{2.000} \quad (4.4)$$

Onde Ep =erro planimétrico; h =altura de vôo

Além das coordenadas X, Y, Z, os sistemas podem registrar a intensidade de retorno do feixe LASER. Baltsavias (1999a) a define como a quantidade de radiação refletida e detectada pelo sensor, proporcional à energia do pulso emitido que retorna ao sistema, discretizada de acordo com a resolução radiométrica de cada sensor. Segundo Katzenbeisser (1999), trata-se da densidade de potência contida no pulso – como a potência do feixe decresce com a distância e sofre atenuação pela atmosfera, a intensidade decresce com a distância – afirma ainda que o menor objeto percebido pelo sensor não depende de seu tamanho, mas sim de sua refletividade, havendo influências de tipo de reflexão, condições atmosféricas e ângulos de iluminação e visada.

Para Katzenbeisser (2002), a intensidade significa algo diferente do que é entendido pela comunidade de sensoriamento remoto. Um LiDAR emite sua própria potência em um ângulo pequeno e ilumina uma porção da superfície. Assumindo que a superfície homogênea reflete esta energia (ou luz), então a intensidade refletida é proporcional à potência emitida, dividida pela área iluminada e multiplicada pela refletividade desta superfície, como é mostrado na equação 4.5.

$$I_m = \frac{P_e}{S^2} \cdot r \quad (4.5)$$

onde I_m =Intensidade refletida; P_e =potência emitida; S =distância; r =refletividade da superfície.

Uma superfície iluminada e observada por um sensor ativo com diversas distâncias resultará em diferentes medidas de intensidade. Portanto, a medida de intensidade precisa ser normalizada para uma distância conhecida para ser comparável (BEHERA e ROY, 2002)

Kalogirou (2006) mostra a diferença entre os valores de intensidade para os valores de reflectâncias de sensores passivos, na mesma região espectral. Zimble et al (2003) diz que pontos de terreno possuem valores altos de intensidade; pontos puramente de copas possuem valores intermediários; pontos que amostram copa e terreno possuem valores muito baixos. Certamente a primeira surpresa é que a intensidade proveniente de vegetais tenha valores menores que a intensidade proveniente do terreno, no infravermelho próximo. As razões são:

- Embora folhas individualmente retroespalhem uma grande proporção de radiação, elas estão dispostas de maneira difusa e desorganizada, reduzindo drasticamente a proporção que retorna ao sensor;
- A mensuração de energia é de apenas uma porção do dossel, podendo amostrar troncos, galhos, etc.;
- O espalhamento múltiplo é menor, por ser uma pequena superfície iluminada;
- Apesar de a reflectância do terreno ser menor que a vegetação, a projeção de iluminação pode gerar alto retorno.

Dados de sensores LiDAR têm sido usados para muitas aplicações, mapeamentos costeiros, hidrográficos, monitoramento de geleiras, estudos ecológicos, modelagem de barragens, cálculos de volumes, geração de modelos de elevações e muitas outras. Algumas delas:

- Mapeamento topográfico – principalmente modelos de elevação precisos;
- Planejamento e desenvolvimento urbano – com diversos avanços em classificadores orientados a objeto;

- Obras de engenharia – rodovias, pontes, cálculos volumétricos de reservatórios e, principalmente, monitoramento de redes elétricas; Schafer e Loch (2005), aplicaram LiDAR em um projeto rodoviário;
- Florestal – Altura e caracterização de dossel, área de copa, contagem de plantas, volume, biomassa, além de remoção virtual de cobertura vegetal. Pode ser utilizado em descrição detalhada da distribuição vertical do dossel (Lefsky et al., 1999b) e modelagem de transmitância de luz em dosséis florestais (Parker et al., 2001).

A tabela 4.1 apresenta algumas características de aplicações LiDAR em florestas, salientando as variáveis utilizadas no presente trabalho.

Tabela 4.1 – Características florestais e derivações LiDAR

Parâmetros Florestais	Derivação LiDAR
<u>Altura de dossel</u>	Medida direta
<u>Topografia subdossel</u>	Medida direta
Distribuição vertical de superfícies interceptadas	Medida direta
<u>Biomassa</u>	Modelagem
<u>Área basal, DAP</u>	Modelagem
Perfil foliar vertical	Modelagem
Volume de dossel	Modelagem
Densidade de árvores grandes	Modelagem
Índice de área foliar, cobertura de copa	Fusão c/ outros sensores
Diversidade de formas de vida	Fusão c/ outros sensores

Fonte: Adaptada de DUBAYAH e DRAKE (2000).

4.2 Materiais & Métodos

Procedimentos

A figura 4.14 ilustra o esquema metodológico utilizado.

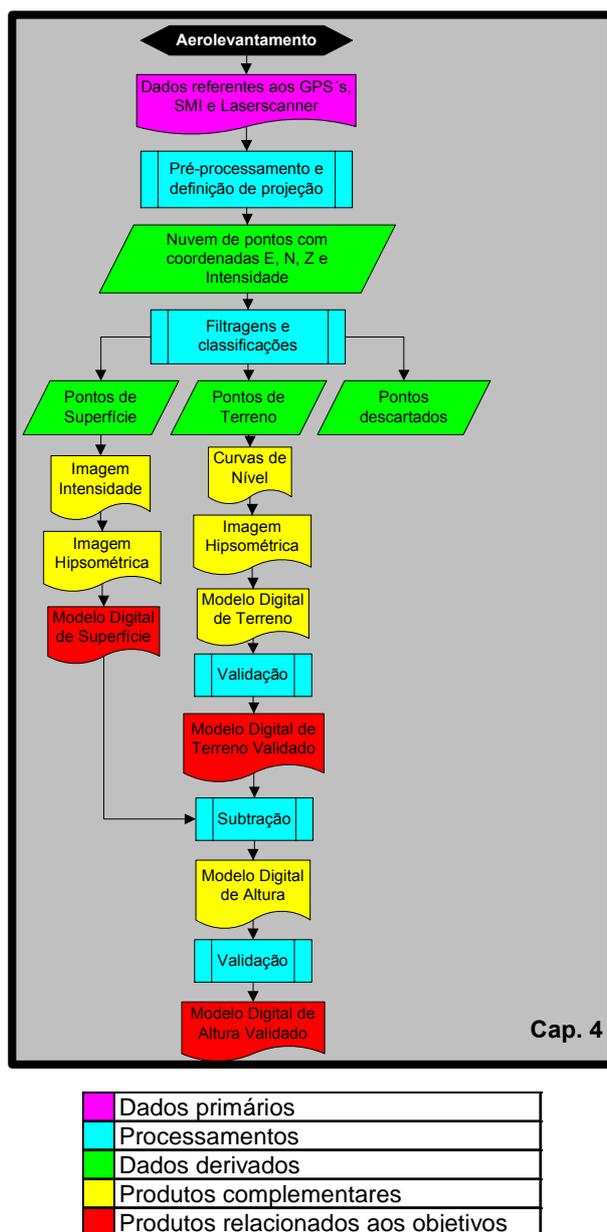


Figura 4.14 – Fluxograma de atividades e produtos decorrentes da aquisição de dados LIDAR.

Após o aerolevanteamento, os dados primários são parâmetros obtidos por três subsistemas: *Laserscanner* (tempo entre transmissão e recepção para cada alvo), DGPS (tempo-GPS e coordenadas X, Y, Z) e SMI (ângulos *alpha*, *phi*, *omega*). Com o pré-processamento, são interpolados todos estes parâmetros e gerados os dados brutos, ou seja, a nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais e intensidade. Através de filtragens e classificações, estes pontos foram selecionados e classificados em pontos de terreno (representação do chão) e pontos de cobertura (representação dos alvos). Reamostrando-se estes pontos em grades regulares (*raster*), foram produzidos diversos produtos, tais como curvas de nível (isolinhas), imagens-intensidade (reamostragem dos valores de intensidade em uma grade regular), imagens hipsométricas (reamostragem dos valores de intensidade e valores altimétricos em uma grade regular), MDS (reamostragem dos valores altimétricos dos pontos classificados como superfície) e MDT (reamostragem dos valores altimétricos dos pontos classificados como terreno). Tal como descrito nos objetivos específicos, o MDT foi validado utilizando-se os dados de referência coletados em campo. Subtraindo-se o MDT do MDS, gerou-se o MDA, que por sua vez, também foi validado com dados de referência coletados em campo.

Programas

- Realm Survey Suite V. 3.5 (Optech) – pré-processamento;
- PosPac (Applanix) – pré-processamento;
- Ultraedit Text Editor V. 14.10 – edição de arquivos de pontos;
- TerraScan for MicroStation V. 008.001 (TerraSolid) – filtragem e classificação de pontos;
- TerraModeler for MicroStation V. 008.001 (TerraSolid) – avaliação de MDS e MDT;
- TerraPhoto for Microstation V. 008.001 (TerraSolid) – mosaicagem e ortorretificação
- Quick Terrain Modeler V. 6.0.6 (Applied Imagery) – geração de Imagens Intensidade e Hipsométrica e de MDS e MDT;

- ArcGis V. 9.2 – Spatial Analyst e 3D Analyst (ESRI) – recortes, geração de MDA e validação de MDT

Dados de Apoio

- Dados vetoriais referentes ao levantamento planialtimétrico de 2007, em formato *shapefile*;
- Fotografias Aéreas em escala 1:10.000, proveniente do aerolevanteamento de 2007.

Aeronave

De acordo com Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec (2007), é necessário um avião bimotor, por motivo de estabilidade, com fixação homologada para o sistema LiDAR, além de possuir tensão de alimentação do sistema de 28 V DC, com capacidade para atingir pico de 35A. Foi utilizado um bimotor Piper Navajo modelo PA31, como pode ser visto na figura 4.15.

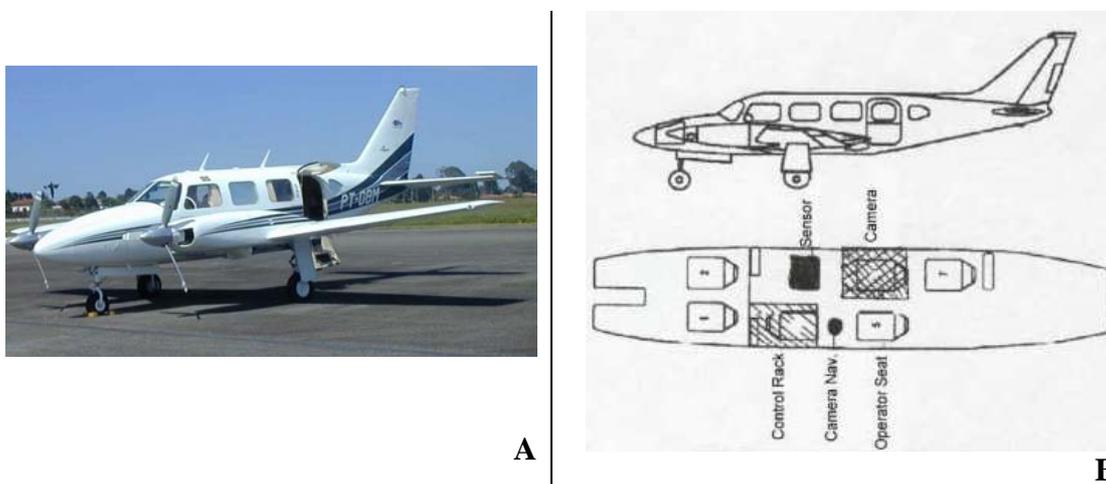


Figura 4.15 – Aeronave utilizada

Fonte: LACTEC (2007)

Sistema LiDAR

- *Laserscanner* Optech ALTM 2050 (50kHz);
 - Ano de fabricação: 2002;
 - Região espectral: 1064nm;
 - Resolução Radiométrica: 8 bits;
 - Quantidade de retornos registrados: 2 (primeiro e último pulsos);
 - Capacidade de armazenamento: 36 Gb;
 - Sistema de varredura – Espelho oscilante (Z-Scan);
 - Divergência: 0,2 mrad.
- Câmera digital KODAK modelo DCS PRO 14N (35mm);
 - Resolução: 13,5 MP
 - IFOV (1.000m): 0,25m.
- Sistema de Medição Inercial: Applanix (200Hz);
- Sistema de Posicionamento a bordo: Novatel Millennium (1Hz);
- Sistema de Posicionamento em solo: Trimble 7400 (1Hz).

A figura 4.16 mostra o equipamento e seus componentes.

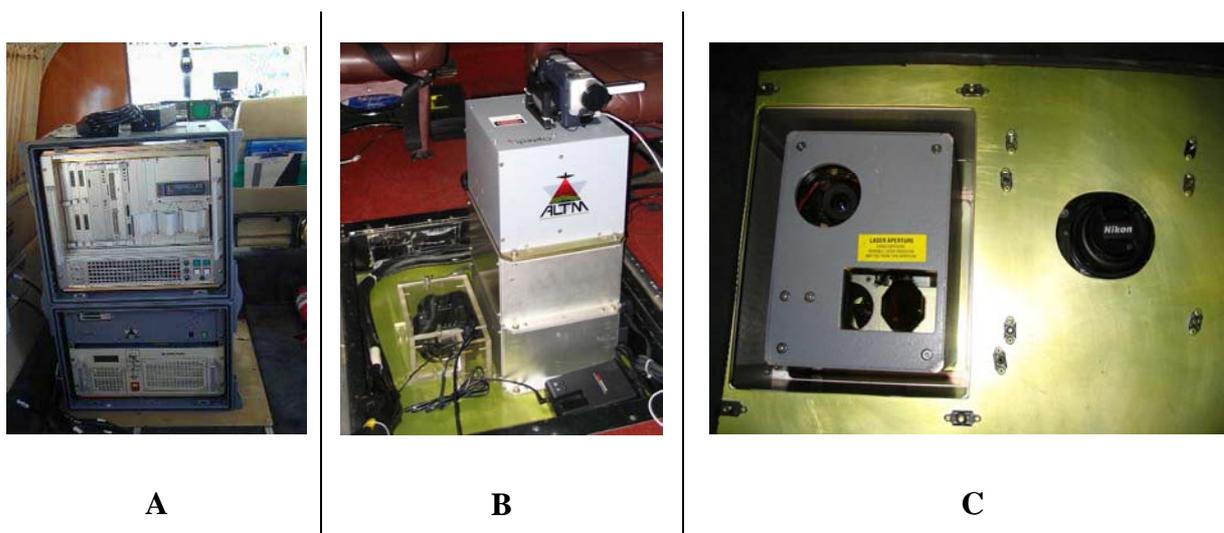


Figura 4.16 – Sensor ALTM 2050, com A) rack de controle; B) emissor/receptor de feixe LASER e; C) vista externa da aeronave, evidenciando-se o *laserscanner* e a câmera fotográfica.

Fonte: LACTEC (2007)

A câmera de acompanhamento foi calibrada e certificada pela UFPR (Universidade Federal do Paraná) para operar como câmera métrica. Está sujeita às mesmas rotações durante o voo, pois é instalada sobre a mesma plataforma que o LiDAR.

Características do aerolevanteamento

- Data do levantamento: 28/04/08;
- Altura de voo: 1.000m;
- Velocidade de voo: 220km/h (150 *knots*)
- *Footprint*: 25cm;
- Frequência de varredura: 58,7Hz;
- Ângulo de varredura: 15°;
- Largura de Faixa: 263m;
- Percentual de recobrimento: 30%;
- Densidade de pontos: 5 pontos/m²;
- Erro planimétrico: 0,5m (1,0 sigma);
- Erro altimétrico: 0,15m (1,0 sigma).

Sistema de posicionamento em solo

O apoio planialtimétrico para o aerolevanteamento foi referenciado ao datum planimétrico SIRGAS2000 e altímetro marégrafo de Imbituba/SC, utilizando o sistema de projeção UTM. Foi estabelecida a base no aeroporto de São José dos Campos/SP.

Pré-processamento

Além da interpolação dos dados referentes ao SMI, DGPS's e *laserscanner*, são incorporados os parâmetros de calibração, obtidos com a realização de vôos em direções opostas, alturas constantes e parâmetros de perfilagem conhecidos, de forma a anular os erros posicionais. Após o pré-processamento, foram realizadas as transformações de referencial e projeção cartográfica. As coordenadas foram projetadas para o sistema UTM, fuso 23S, com referencial planimétrico no datum SIRGAS2000 e altimétrico em

Imbituba/SC. Todas as calibrações foram realizadas pelo LACTEC. A figura 4.17 esquematiza o pré-processamento.

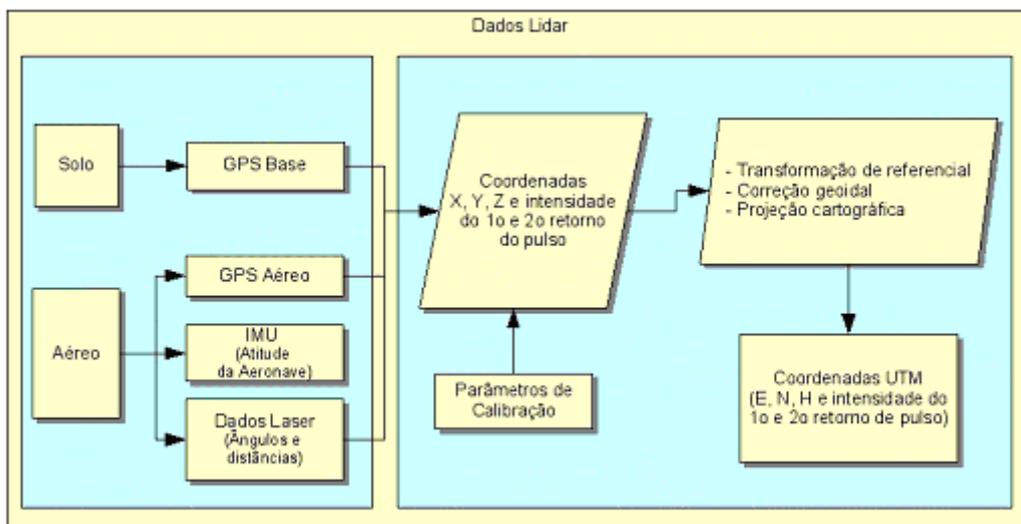


Figura 4.17 – Pré-processamento

Fonte: Zandoná (2006).

Devido às limitações computacionais relacionada à quantidade de pontos, a área de estudo deve ser fragmentada em projetos menores – unidades chamadas de blocos. O critério utilizado para a definição do tamanho destes blocos foi a escolha de plotagem em cartas 1:2.000. A figura 4.18 ilustra a fragmentação do perímetro da área de estudo em 6 blocos e a tabela 4.2 mostra a quantidade de pontos para cada bloco.

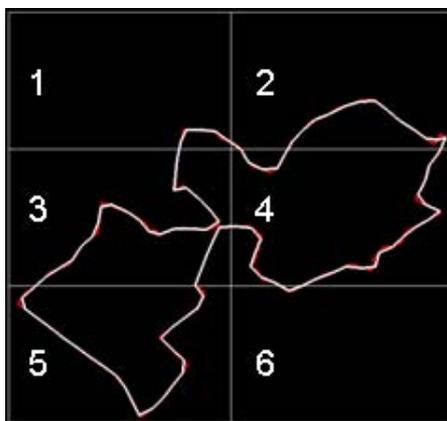


Figura 4.18 – Fragmentação da área de estudo (perímetro) em 6 blocos

Tabela 4.2 – Quantidade de pontos

Bloco1 (bin)	2.840.024,00
Bloco2 (bin)	4.522.386,00
Bloco3 (bin)	11.784.494,00
Bloco4 (bin)	13.583.880,00
Bloco5 (bin)	12.403.651,00
Bloco6 (bin)	7.086.387,00
Total (bin)	52.220.822,00

A estrutura básica do arquivo de pontos é apresentada na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Estrutura básica do arquivo de pontos

	Coordenadas planas do primeiro retorno				Coordenadas planas do último retorno			
Tempo GPS	E	N	H	I	E	N	H	I

A primeira filtragem realizada é a eliminação dos ruídos (*outliers*). Trata-se de alvos como nuvens e corpos d'água e demais pontos que prejudicaram a qualidade dos modelos gerados. Foram utilizados dois critérios: i) altimétrico – descartou-se todas as altitudes abaixo de 500m e acima de 1.000m; ii) radiométrico – descartou-se valores anômalos.

Após a eliminação dos *outliers*, houve a necessidade de se classificar os pontos referentes ao terreno. O principal objetivo foi separar os pontos que refletiram o chão do restante. Segundo Assunção et al. (2007), os métodos de classificação para dados LASER podem ser agrupados em:

- Método da Declividade: Essencialmente a idéia desse filtro é a de que, para uma das diferenças de altura entre dois pontos, a probabilidade do ponto mais alto não pertencer ao terreno aumenta com a diminuição da distância linear entre eles (SITHOLE e VOSSSELMAN, 2003);
- Método da Superfície: Sithole e Vosselman (2004) definiram que um ponto p1 pertence ao terreno (T) se, para qualquer ponto p1, pertencente ao terreno, a

diferença de altura entre esses pontos é menor que a diferença máxima permitida, calculada em função da distância entre esses pontos;

- Método da segmentação – Neste caso, o conjunto de dados é inicialmente segmentado e depois classificado, considerando que os pontos de um segmento (*cluster*) não pertencem ao terreno se a altura do segmento estiver acima dos segmentos na vizinhança.

O classificador utilizado foi o de Alexiades, implementado no programa TerraScan e recomendado por Axelsson (1999), por utilizar valores originais da nuvem de pontos na geração dos modelos. Primeiramente há uma pesquisa dos pontos iniciais e geração de um TIN¹⁸ temporário. Na segunda fase, há um ajuste dos pontos à superfície de modo iterativo, selecionando os pontos cada vez mais próximos do suposto terreno. Os parâmetros de iteração são definidos por ângulos e distâncias, que determinam os pontos que deverão ser ignorados ou adicionados ao modelo, tal como na figura 4.19. Utilizou-se os parâmetros indicados para áreas florestais, tais como ângulo de 15° em relação ao terreno e 1m de distância.

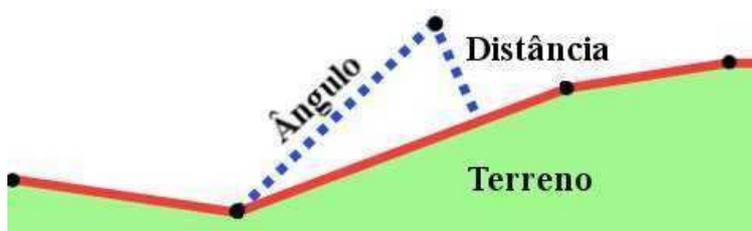


Figura 4.19 – Parâmetros de ajuste para classificação de pontos

Fonte: Zandoná (2006).

Os pontos não-descartados nem classificados como terreno foram agrupados em uma classe chamada “superfície”.

¹⁸ Triangulated Irregular Networking

A partir dos pontos devidamente classificados foram gerados os modelos digitais. A conversão da nuvem de pontos para uma grade regular utilizou interpolação linear, com células de 0,25m para todos os modelos, compatível com a densidade de pontos/m². Lam (1983) apresenta uma revisão abrangente a respeito de métodos de interpolação espaciais. Recomendam o emprego de técnicas de interpolação exatas, como Krigagem, *Spline* e IDW (Inverse-Distance-Weighted).

Após a geração dos modelos, são imprescindíveis a análise e edição manual, visando eliminar erros que se mantiveram após as filtrações. É muito difícil interpretar dados LASER a não ser que imagens de alta resolução do mesmo local estejam disponíveis. Com base nisso, a nuvem de pontos foi sobreposta na imagem de intensidade e na fotografia aérea.

A validação do MDT foi realizada com os dados provenientes dos perfis longitudinais, utilizando o erro médio quadrático como parâmetro.

Após a geração do MDS e MDT e a diferença entre ambos, são obtidas as alturas dos alvos. A grade regular resultante desta subtração é chamada de MDA, validada através das alturas máximas das árvores.

4.3 Discussão dos resultados

Todos os produtos gerados foram recortados a partir das divisas da fazenda (perímetro) e utilizaram o sistema de projeção UTM, datum planimétrico SIRGAS2000 e datum altimétrico Imbituba/SC. A figura 4.20 mostra a proporção entre as três classes de pontos.

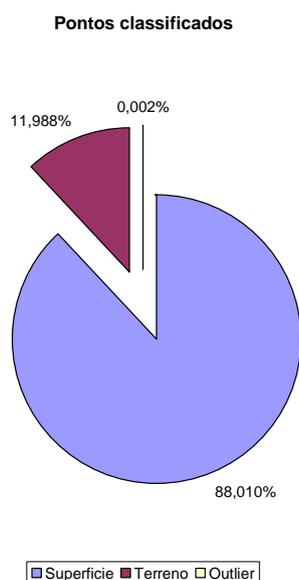


Figura 4.20 – Proporção entre as classes de pontos

O percentual de pontos de terreno, neste caso, não pode ser confundido com a taxa de penetração, que é a relação entre o número de pulsos refletidos pelo alvo e o número total de pulsos emitidos pelo sistema. Este percentual depende do tipo de vegetação e de algumas características da execução do voo, tais como a altura, ângulo de varredura e principalmente o *footprint*. A taxa de penetração na vegetação e a capacidade da última reflexão do sinal atingir o solo são maiores quando o diâmetro do pulso é menor e a incidência deste pulso for mais perpendicular. Admite-se como taxa de penetração a abertura foliar, ou seja, cerca de 30%, equivalente às florestas de vegetação mista (SALLEM FILHO e BONATTO, 2004).

As figuras 4.21 e 4.22 mostram as imagens de intensidade para os pontos classificados como superfície e terreno, respectivamente. Estes produtos não contêm altimetria, entretanto podem ser utilizados em combinações com os modelos digitais ou mesmo isoladamente para auxiliar na interpretação de alguma feição. Observando-se os locais circulados, é possível perceber a baixa penetrabilidade do feixe em taquarais (bambus), devido à densa folhagem e, conseqüentemente, alto índice de área foliar, verificados pelos tons de cinza (quanto mais claro, maior o retroespalhamento). As figuras 4.23 e 4.24 mostram as imagens hipsométricas para os pontos classificados como superfície e terreno, respectivamente. As figuras 4.25 e 4.26 mostram os modelos digitais – MDS e MDT, respectivamente. A figura 4.27 mostra um detalhe tridimensional referente à gleba 2 da área de estudo.

Um modelo digital pode ser gerado a partir de dados topográficos/geodésicos, estereoscopia, interferometria e varredura a laser. Cracknell e Hayes (1987) compararam fotogrametria, interferometria e LiDAR modelos digitais de áreas florestais e concluíram que este último apresentou precisões mais altas (cm), levantamentos rápidos, porém alto custo. Baltsavias (1999a) e Zandoná (2006) fazem um comparativo com fotogrametria, citando algumas vantagens do *laserscanner*, tais como amostragem satisfatória em áreas com vegetação densa e aquisição direta de coordenadas tridimensionais XYZ. Behera e Roy (2002), comparando *laserscanner* e radares, comentam sobre as vantagens para mensuração de distâncias nos pulsos com alta energia que podem ser emitidos em curto intervalo de tempo. Lewis e Hancock (2007) salientam que as vantagens do LiDAR em relação a outras formas de sensoriamento remoto é a mensuração acurada da altura, pois altura da vegetação é uma propriedade biofísica importante para indicar características da cobertura florestal que está sendo observada, tais como tipo, estado ou outros aspectos úteis para o monitoramento e modelagem.

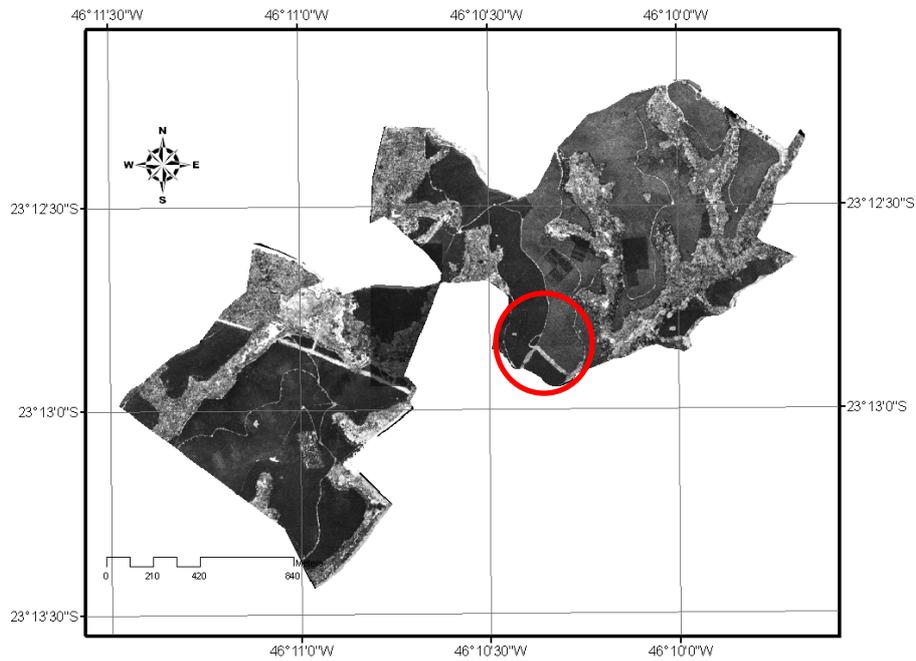


Figura 4.21 – Imagem Intensidade gerada a partir dos pontos de **superfície**. Ressalta-se o alto retroespalhamento nas fileiras de bambu (cinza claro).

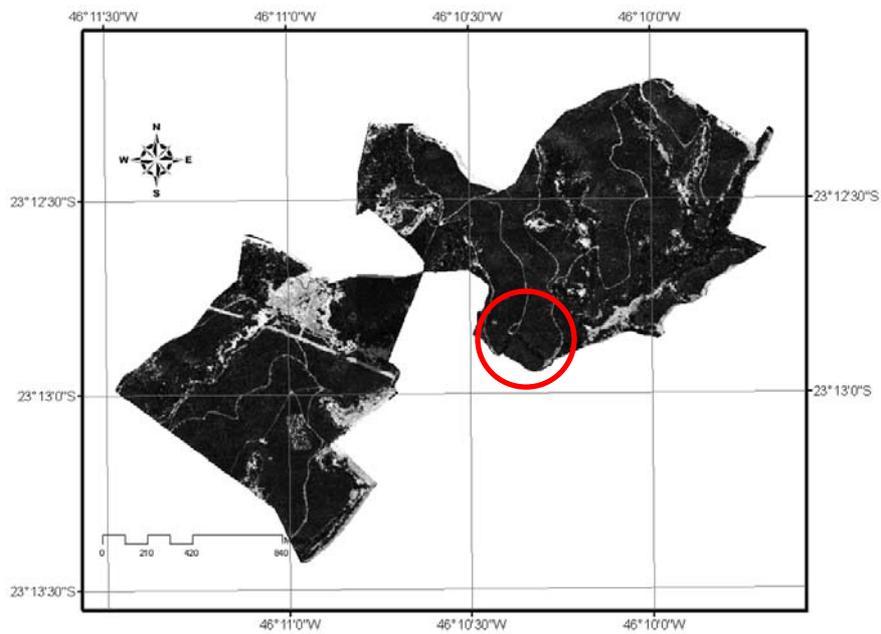


Figura 4.22 – Imagem Intensidade gerada a partir dos pontos de terreno. Ressalta-se o baixo retroespalhamento nas fileiras de bambu (cinza escuro), evidenciando-se a penetrabilidade do feixe LASER.

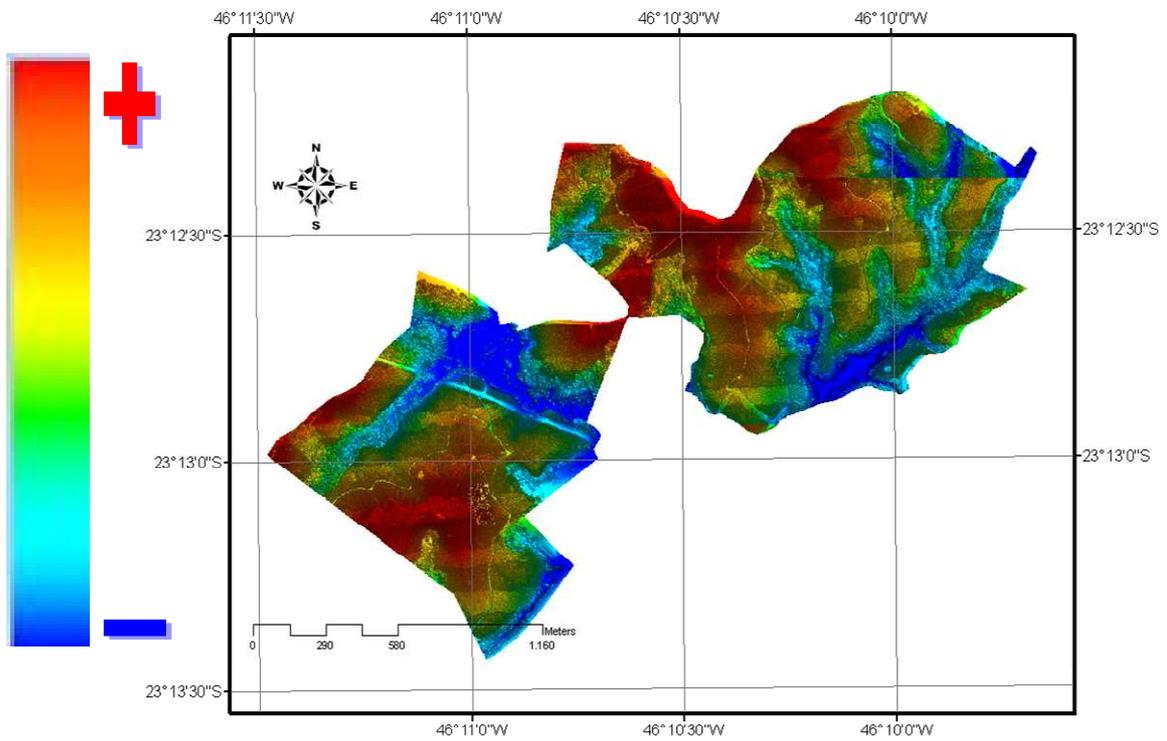


Figura 4.23 – Imagem Hipsométrica gerada a partir dos pontos de superfície

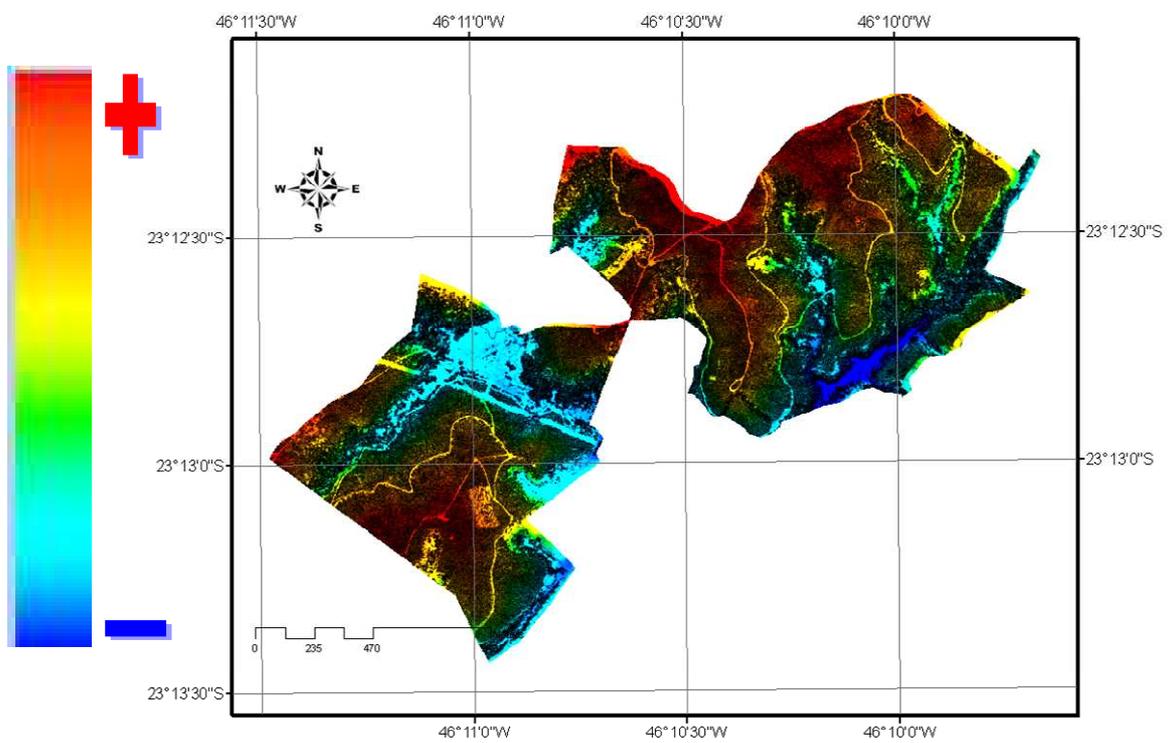


Figura 4.24 – Imagem Hipsométrica gerada a partir dos pontos de terreno

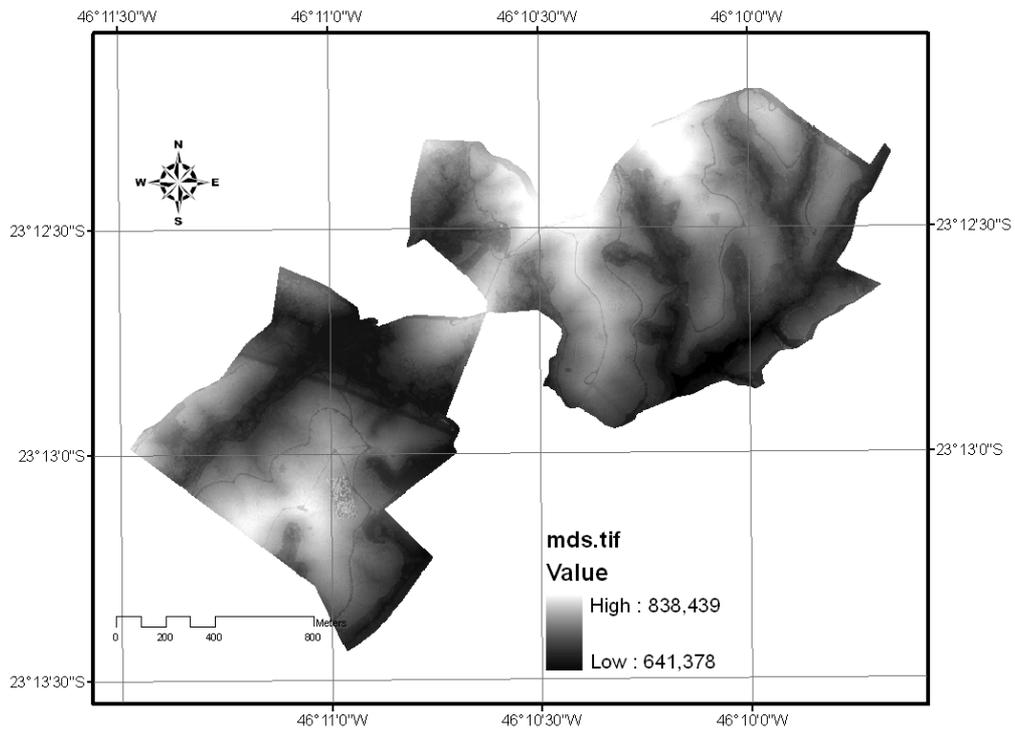


Figura 4.25 – Modelo Digital de Superfície

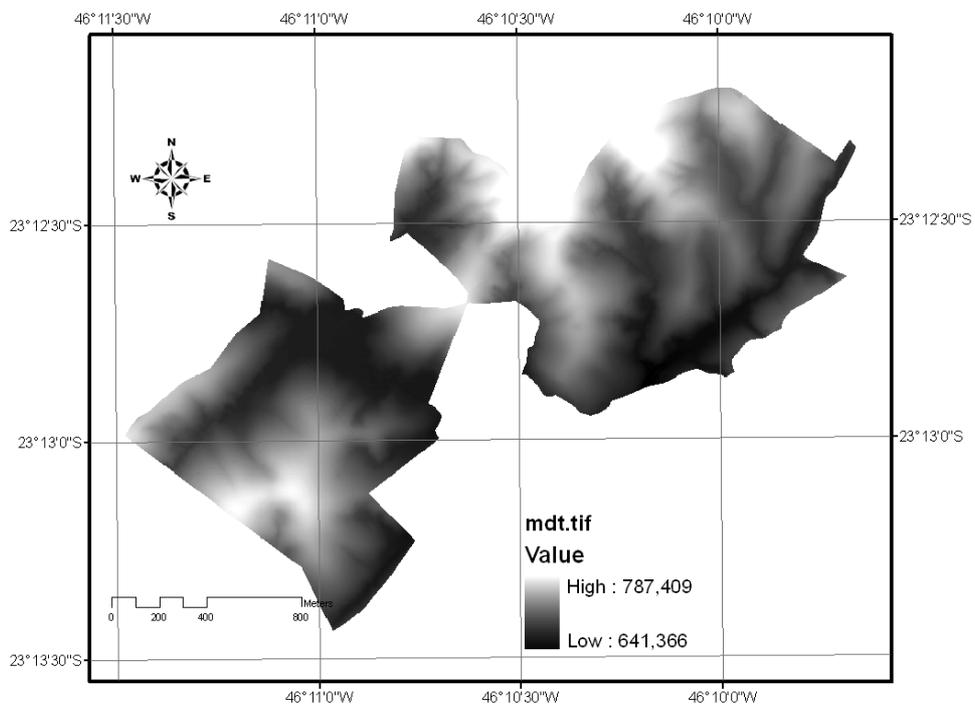


Figura 4.26 – Modelo Digital de Terreno

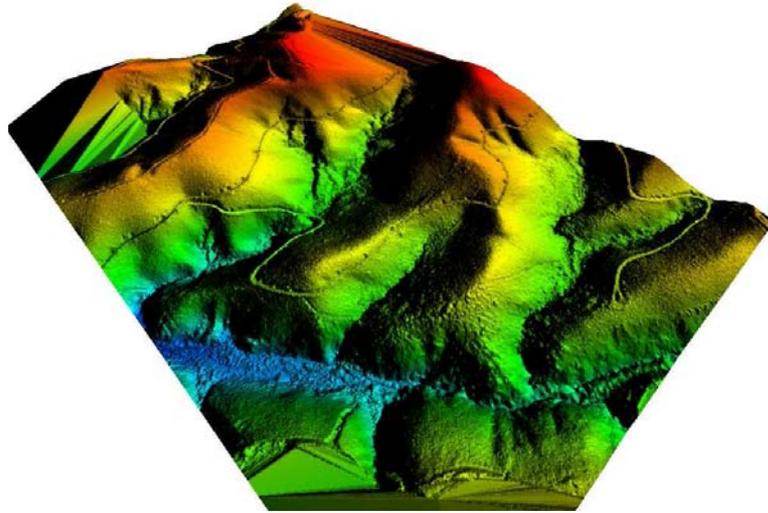


Figura 4.27 – Detalhe tridimensional referente à gleba 2

Em função das características da área de estudo: alta declividade do terreno e cobertura vegetal densa foi necessária a realização de conferência e classificação manual para garantir a qualidade da modelagem. Na figura 4.28 há a comparação do MDT derivado do LiDAR com os 4 perfis longitudinais obtidos através de levantamento topográfico e os resultados numéricos estão expressos na tabela 4.4.

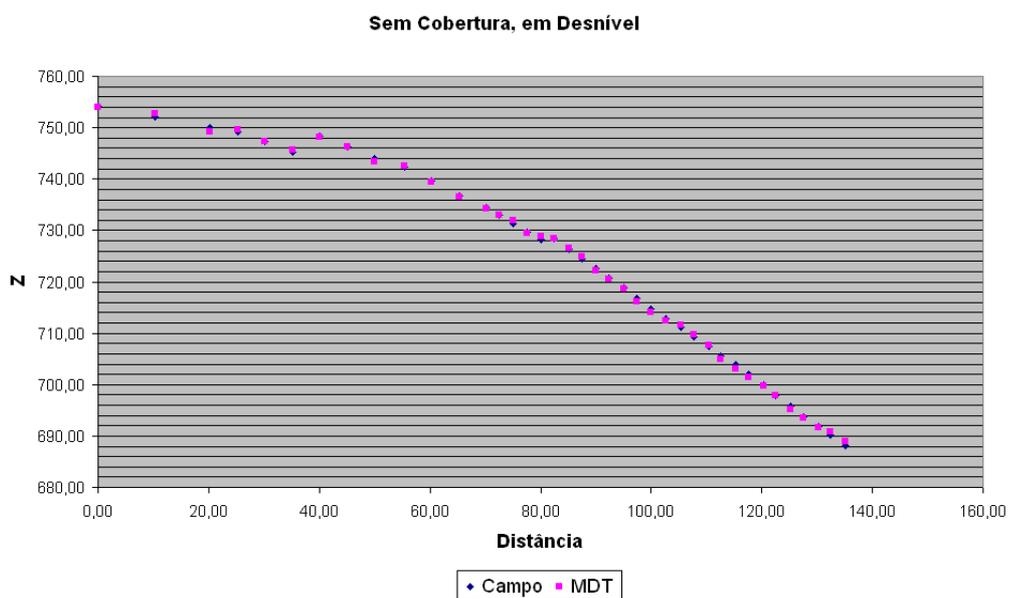
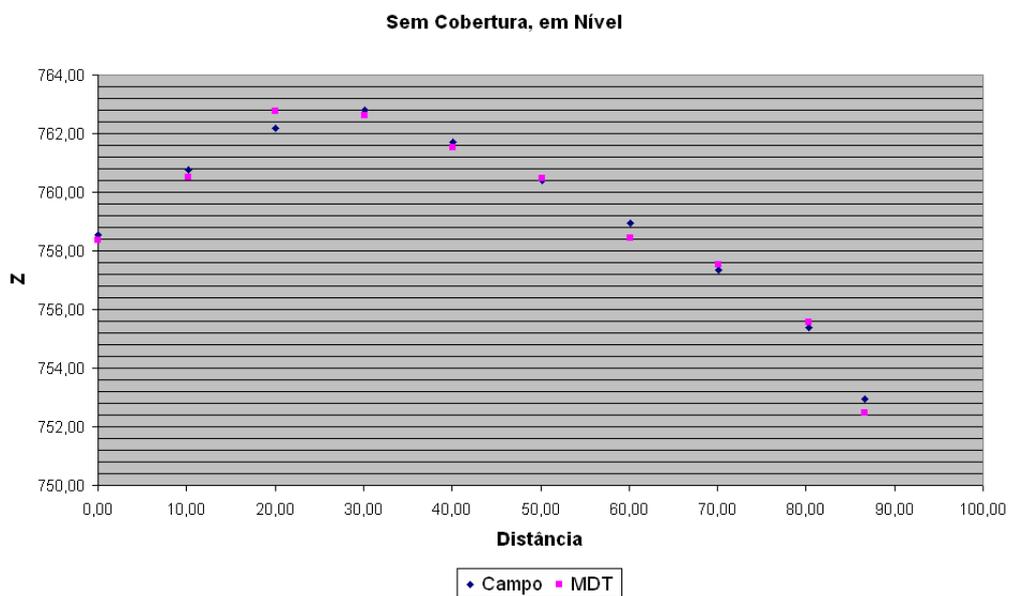


Figura 4.28 – Comparação entre o MDT e os perfis longitudinais (Continua)

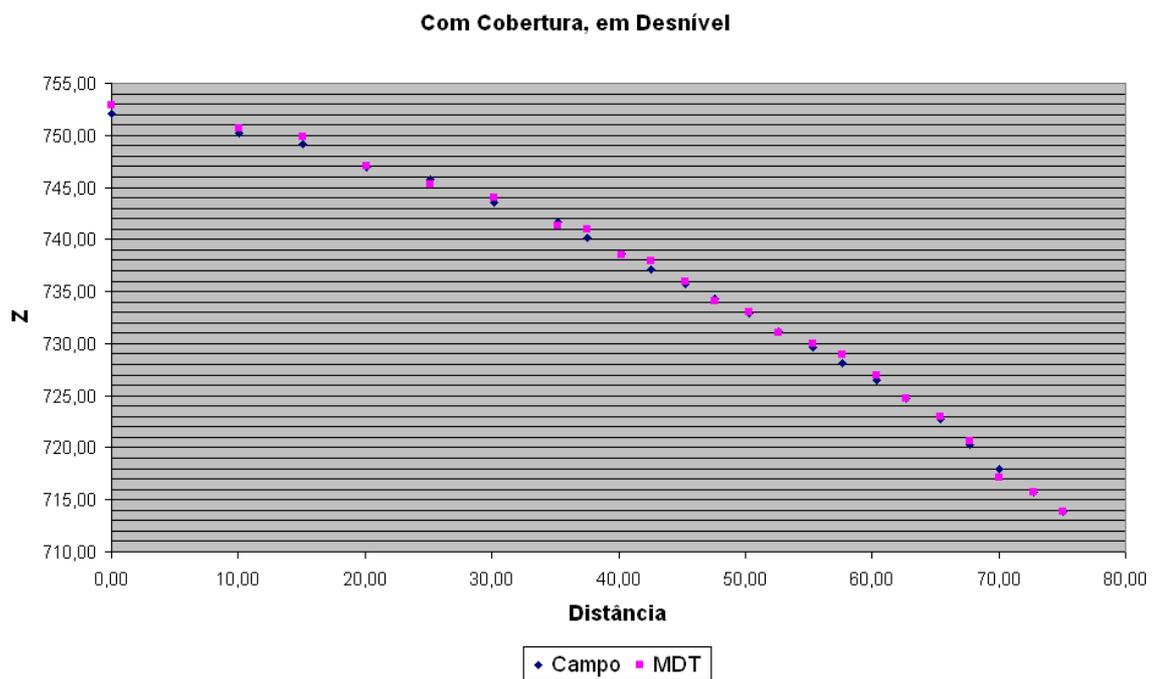
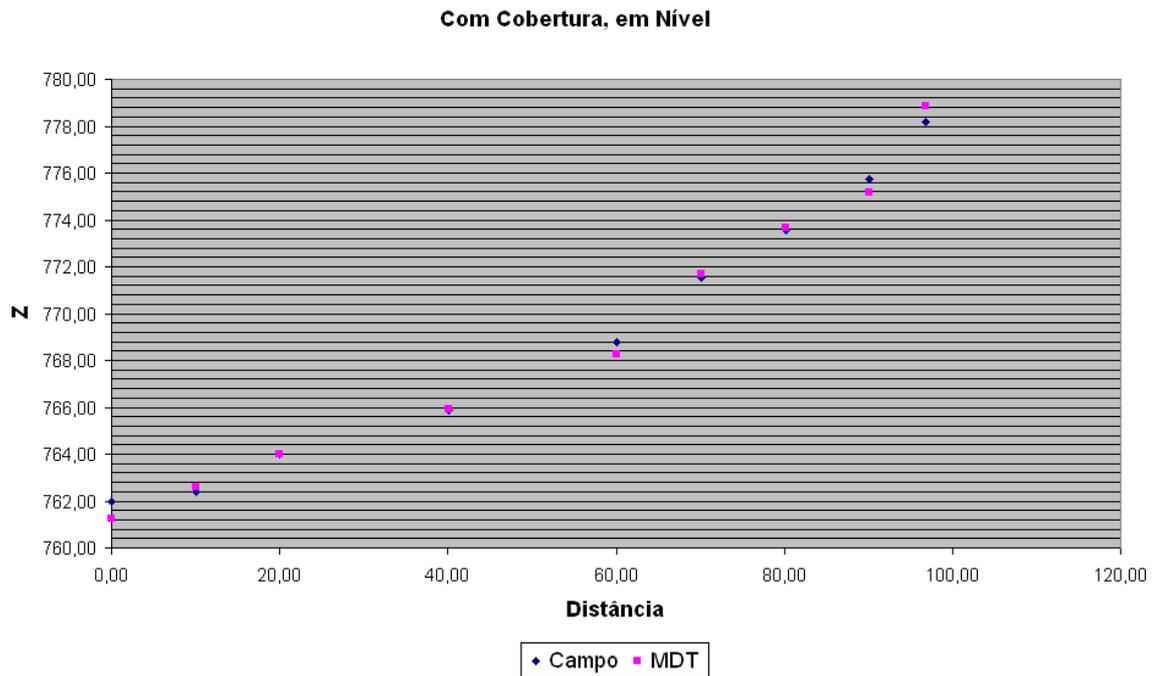


Figura 4.28 – Conclusão

Tabela 4.4 – Comparação entre pontos cotados em campo e extraídos do MDT

Perfis	Campo		MDT		RMS (m)
	Cota (m)		Cota (m)		
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	
Sem cobertura arbórea, em nível	752,93	762,81	752,49	762,75	0,33
Sem cobertura arbórea, em desnível	688,10	754,21	689,00	754,03	0,47
Com cobertura arbórea, em nível	761,99	778,19	761,26	778,86	0,44
Com cobertura arbórea, em desnível	713,83	752,08	713,90	752,87	0,50
Média					0,44

O erro altimétrico nominal de um aerolevante LiDAR de 1.000m de altura é calculado em 0,15m para locais sem cobertura vegetal. Considerando que não houve presença de vegetação herbácea e não houve diferenciação entre os RMS's obtidos nos perfis com e sem cobertura, em nível ou em desnível, acredita-se que uma grande influência no erro altimétrico é o detalhamento presente no micro-relevo ocasionando a influência do erro posicional planimétrico na medida altimétrica.

Através da subtração dos modelos (MDS-MDT), gerou-se o MDA, que servirá de insumo básico para a delimitação das árvores, expresso na figura 4.29.

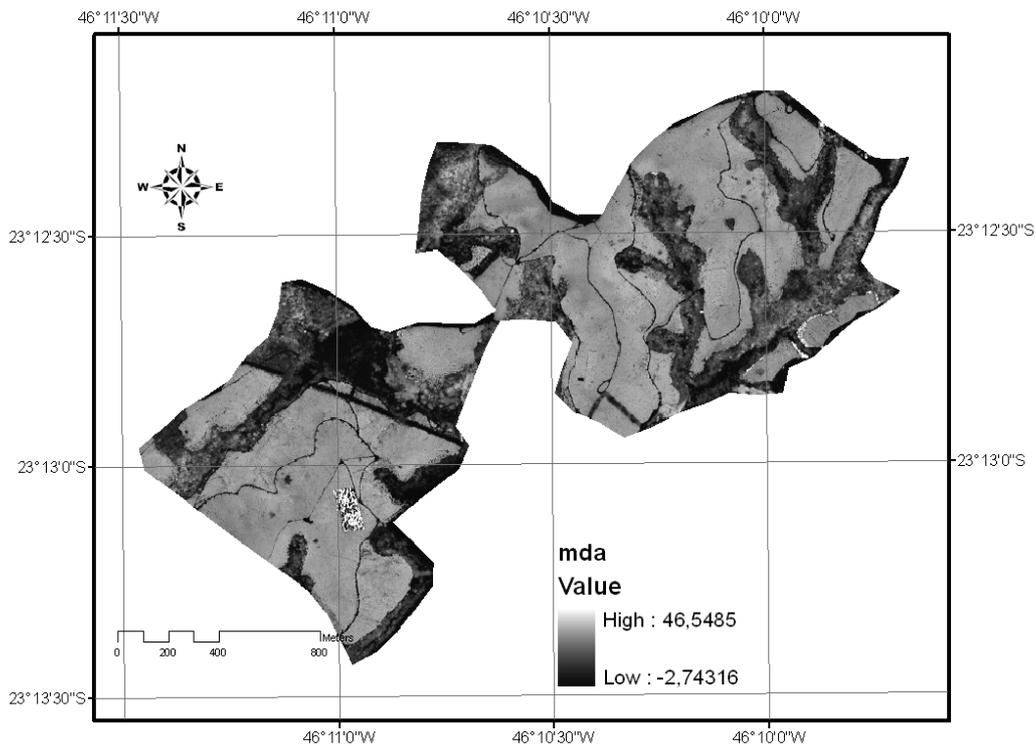


Figura 4.29 – Modelo Digital de Altura dos alvos

Os valores máximos deste MDA são relacionados às parcelas com eucaliptos velhos, com aprox. 20 anos de idade, e torres de alta tensão. Os valores negativos são dados espúrios referentes à pequenos corpos de água. As alturas máximas das árvores consideradas nas áreas de plantio efetivo são de 25m, aprox.

Sua validação foi realizada através das alturas máximas por parcela, extraídas do MDA através de polígonos criados a partir dos vértices de cada parcela, manualmente. Os resultados estão apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Comparação entre MDA e alturas máximas medidas em campo, ao nível de parcela

Parcela	Altura Maxima (m)		Diferença Absoluta (m)
	MDA	Campo	
1	22,24	22,30	0,06
2	25,55	25,70	0,15
3	24,00	25,40	1,40
4	24,85	24,90	0,05
5	22,45	24,50	2,05
6	24,71	23,60	1,11
7	23,47	22,50	0,97
8	22,56	24,30	1,74
9	24,75	24,60	0,15
10	24,18	23,80	0,38
11	23,65	23,30	0,35
12	25,19	24,70	0,49
13	24,64	25,80	1,16
14	23,02	23,00	0,02
15	24,00	23,30	0,70
17	24,03	22,80	1,23
18	24,15	24,40	0,25
19	23,11	23,60	0,49
20	23,65	24,90	1,25
21	23,90	24,20	0,30
Mínima			0,02
Máxima			2,05
Média			0,72
RMS			0,93

Esta validação teve como objetivo apenas avaliar a acurácia do MDA em relação aos valores máximos, não sendo utilizada para avaliar a altura total da árvore como insumo da estimativa volumétrica.

Considerações Finais

Em geral, os valores máximos de alturas contidos no MDA são menores que os medidos em campo, característica também encontrada em Zandoná (2006). De acordo com as comparações realizadas, os modelos gerados podem ser utilizados para a obtenção de variáveis dendrométricas, requisitos para a modelagem volumétrica.

5. EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA COM DADOS LASER

Neste capítulo estão presentes todos os tópicos referentes à extração de variáveis dendrométricas e estimativa de volume a partir do MDA, envolvendo a fundamentação teórica, procedimentos metodológicos e discussão dos resultados.

5.1 Fundamentação

Este tópico trata dos conceitos teóricos essenciais ao entendimento do capítulo. São abordados os algoritmos de extração das variáveis dendrométricas e aspectos pertinentes à estrutura de dossel.

A partir de dados obtidos por *laserscanner* extraiu-se algumas variáveis dendrométricas, tais como a quantidade de árvores, altura total e área (ou diâmetro) de copa. Dependendo do grau de correlação, é possível se estimar outras variáveis, tais como área basal (ou DAP) e volume. Para realizar estas extrações, há diversas abordagens que podem ser classificadas quanto ao nível de análise, tais como talhão (*stand*), parcela (*plot*) ou árvores individuais, como é geralmente citado na literatura especializada. As três abordagens exigem um georreferenciamento compatível com a precisão do *laserscanner*. Na análise de árvore individual, é necessária alta resolução, obtida através de sensores com *footprint* estreito e vôo, relativamente, baixo (em torno de 1.000m) (TIEDE et al, 2006; ZANDONÁ et al, 2007).

Dubayah et al (2000) relataram as principais variáveis dendrométricas passíveis de serem estimadas com dados LASER e afirmam haver fortes correlações entre muitos fatores como volume madeireiro, índice de área foliar e altura de árvore.

Ainda não há aplicativos comerciais disponíveis para a delimitação das árvores e extração de variáveis dendrométricas. Baltsavias (1999b) comenta que os programas comerciais limitam-se a converter, visualizar e classificar pontos, além de gerar

modelos de superfície, embora produtos como contagem de indivíduos, cálculo de altura e área de copa, restringem-se a soluções locais e não-comerciais.

A delimitação das árvores pode ser realizada a partir das copas, tais como segmentação em imagens ópticas, ou a partir das alturas, assumindo-se um ponto de máxima (ápice) por árvore, ou a partir das duas informações. Neste texto não serão abordadas técnicas que buscam a delimitação arbórea diretamente na nuvem de pontos tridimensionais, nem técnicas que utilizam fotografias ou imagens orbitais de alta resolução como co-variável (através de classificação orientada a objeto, principalmente). Como exemplo, St-Onge et al (2004) delimitaram árvores em um MDA e estereopares fotográficos.

Uma abordagem pioneira para algoritmos que utilizam o MDA como insumo principal para a individualização das árvores, é a adaptação de técnicas como *watershed*. Busca-se inverter o MDA (picos viram vales) e calcular os volumes das “microbacias” até a delimitação dos divisores de águas. Os fundos de vales (*sinks*) tornam-se picos de árvores e os divisores de água (*breakline*) tornam-se as bordas das copas. Trata-se de uma aproximação simples, onde não se admite sobreposição e/ou afastamento de copas. Este tipo de lógica, com diversas adaptações, está presente no algoritmo ITC - Individual Tree Crown (GOUGEON, 1998).

Outra abordagem é a busca pelos valores mínimos locais (Local Mínima). Através da ligação destes *pixels* há a formação de polígonos que representam as copas. As áreas dos polígonos representam as áreas das copas e o centróide representa a altura. Este tipo de lógica está presente no algoritmo TreesVIS HALCON e no algoritmo de Sterencezak (DIEDERSHAGEN et al, 2000).

A tendência de se formar copas justapostas é uma limitação nas duas abordagens anteriores (BRANDTBERG et al, 2003). Ao invés de se iniciar pelas mínimas locais, é possível buscar as máximas locais (Local Máxima). Friedlaender e Koch (2000) expressam a importância da lógica do algoritmo “local máxima” para a identificação do topo de uma árvore. Porém, ao se buscar esta estratégia, é importante distinguir árvores coníferas (gimnospermas) de folhosas (angiospermas). As primeiras possuem copas

com forma de cone, com um pico bem delimitado, enquanto as segundas possuem copas que tendem a ser convexas (como um guarda-chuva), com um pico no ápice, mas não necessariamente. Para coníferas, cada topo nos *pixels* vizinhos é considerado outro indivíduo arbóreo. Porém, há problemas em copas de folhosas, pois estas podem apresentar diversos “topos” irregularmente distribuídos (HYYPPE e HALLIKAINEN, 1996).

Estes pontos devem representar o topo dos indivíduos arbóreos, portanto, é necessário que se conheça algumas características dos dados, tais como as estatísticas básicas referentes às dimensões das copas e altura, visando reduzir as chances de se demarcar mais de um ponto de máxima na mesma copa ou juntar copas (erros de comissão/omissão). Persson et al (2002) determinaram os topos das árvores através do “local máxima”, validando os resultados com a posição da árvore no terreno. Porém, esta validação é extremamente complicada, devido aos problemas de multicaminhamento em levantamentos DGPS sob dossel, tortuosidade do fuste e ação de ventos (BRANDTBERG et al, 2003; POPESCU E ZHAO, 2008).

Independente da forma da copa recomenda-se suavizar o MDA através de filtros “passa-baixa”, de moda ou mediana, visando preservar as bordas (BEVEN, 1995) antes da aplicação de qualquer algoritmo, reduzindo a chance de se delimitar mais de uma árvore em copas com mais de um ponto de máxima. O tipo de filtro e o tamanho da janela a ser utilizada é ponto crítico e deve ser avaliado caso a caso, dependendo das características dos dados. Um cuidado que deve existir em relação à suavização é a redução do valor presente no ponto de máxima, subestimando a altura (BUFTON et al, 1991; BLAIR et al, 1994). Kwak et al (2007) detectaram informações espúrias através do “local máxima”, gerando situações em que ocorreram mais de um topo na mesma árvore e situações em que não foi detectado um topo para uma árvore dominada. Aplicou-se um filtro morfológico de transformação máxima, visando minimizar a chance de detectar dois topos de árvores na mesma copa. Para a delimitação das copas, estes mesmos autores utilizaram um filtro suavizador no filtro morfológico, gerando-se uma imagem 0 e 1; reverteram-na e mediram a distância euclidiana. Desta distância são delimitadas as bordas das copas. Os autores afirmam que a baixa densidade de pontos pode

comprometer a acurácia da delimitação de copas. Popescu e Zhao (2008) avaliaram os filtros *Wavelet* e *Fourier*, análises de percentis, para esta finalidade e concluíram que o filtro de *Fourier* apresentou os melhores resultados na análise de estrutura vertical.

Após a determinação do topo das árvores, é possível delimitar as copas através de um raio de busca, que pode ser fixo, definido a partir de uma dimensão média da copa, ou móvel, a partir de uma relação hipsométrica. Esta é a estratégia presente no TreeVAW (KINI e POPESCU, 2004), porém ele define somente o ponto de máxima e um raio de copa, pressupõe relação entre altura e copa e gera copas circulares, mas permite sobreposição. Em povoamentos clonais, devido à seleção genotípica, as alturas tendem a uma homogeneidade, enquanto para outros parâmetros biofísicos (copa e DAP), não ocorrem. Por isto, as relações hipsométricas são muito baixas, limitando a utilização deste algoritmo.

Outra forma de se delimitar as copas é através de algoritmos de crescimento por região, definindo-se limiares, tais como altura mínima, diâmetro máximo, diâmetro mínimo.

Lang et al (2006) detectaram árvores individuais e analisaram a estrutura de dossel, utilizando algoritmos de máximas locais por crescimento de regiões e análise orientada a objetos, através de uma séries de regras de classes específicas e aplicação de métricas de paisagens – Índice *Shannon Evenness* e Índice de Divisão. Estes dados podem ser analisados por geoestatística ou técnica de janela móvel. Os autores citados conseguiram uma acurácia de 72,2% para as árvores dominantes e 51% para todo o povoamento.

Popescu (2002) utilizou filtragem local com janela móvel (tamanho variável) e além de utilizar o “local máxima” para valores de Z, incluiu valores de intensidade melhorando o modelo. A janela móvel demonstrou-se ser útil para locais com diferenças de idade ou de espécies que possuem copas com formas diferentes.

Popescu e Zhao (2008) utilizam o conceito de *voxel*, que é a distribuição vertical dos pontos em uma representação espacial de cubo e ainda estimaram a altura comercial (fuste) através de pontos de inflexão.

Roberts et al (2005), conseguiram estimar Índice de Área Foliar (IAF), remotamente, de plantações de pinheiros de 16 anos de idade, baseando-se em altura e dimensão da copa. Concluem que o sucesso em predizer o IAF depende exclusivamente da estimativa correta de altura e área de copa.

5.2 Materiais & Métodos

Procedimentos

A figura 5.1 ilustra o esquema metodológico utilizado para extração de variáveis dendrométricas, estimativa do volume madeireiro e validação.

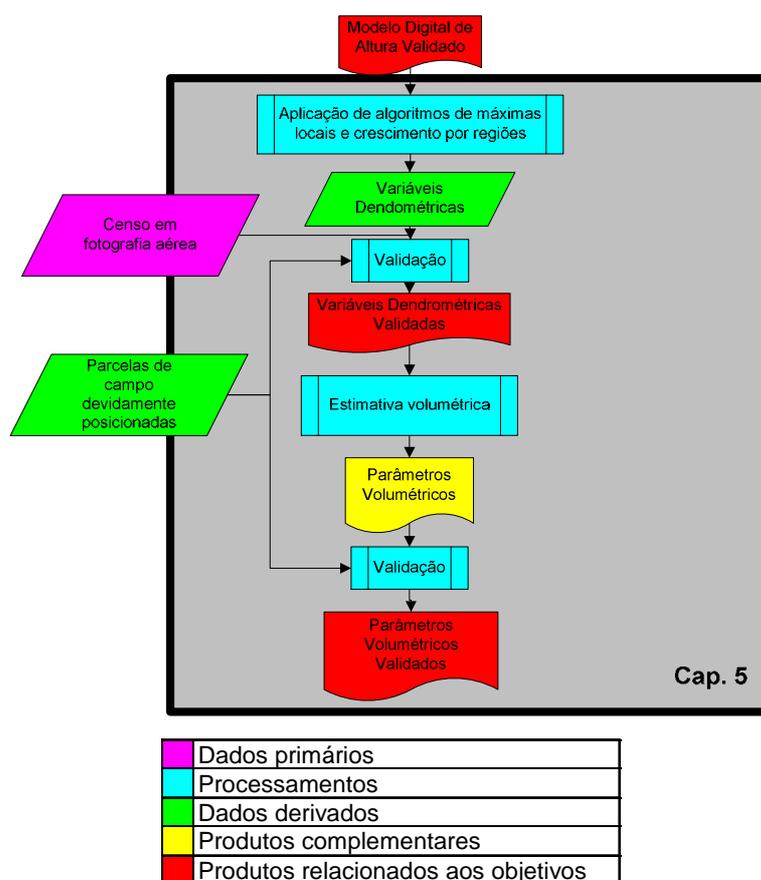


Figura 5.1 – Fluxograma de atividades e produtos decorrentes da análise de parâmetros biofísicos e estimativa volumétrica.

O insumo básico para a extração das variáveis dendrométricas foi o MDA, contendo o valor de altura dos alvos em cada *pixel*. O algoritmo desenvolvido inicia procurando os pontos de máxima. Para isto, utiliza uma janela de busca com dimensão equivalente ao tamanho médio da área de copa – 7,83m² ou 11x11 *pixels* – e um deslocamento

equivalente ao desvio padrão da área de copa – $3,27\text{m}^2$ ou $7 \times 7 \text{ pixels}$, tal como ilustrado na Figura 5.2.

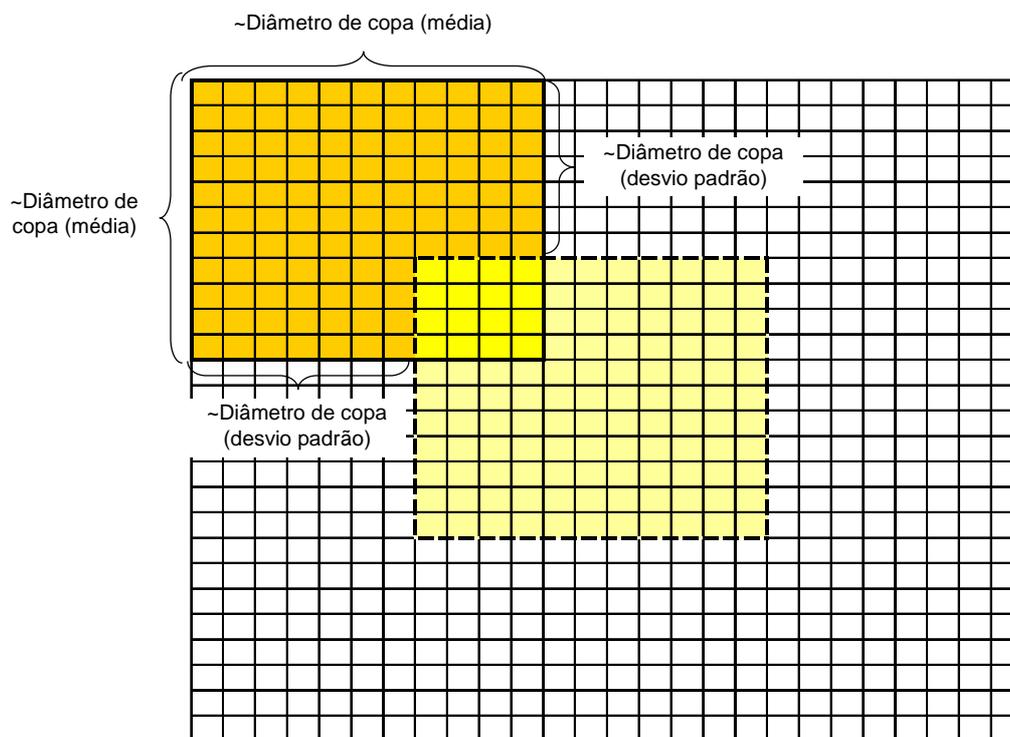


Figura 5.2 – Esquema ilustrativo da lógica de Máximas Locais.

Após a definição dos pontos de máxima, realizou-se uma rotina de crescimento por região para a formação dos polígonos que representam as copas, ilustrada na Figura 5.3. Agregou-se aos pontos de máxima, os próximos pontos de máxima, sucessivamente, até atingir uma das condições limitantes pré-estabelecidas, que no presente caso, foram:

- Altura mínima: 10m;

- Área de copa máxima¹⁹: – 18,47m² ou 300 *pixels*;
- Definição da região nos limites do próximo polígono.

1. Buscará o mais similar (2º maior)
2. Até varrer tudo OU atingir algum limitante:
 - Encostar em outro polígono
 - Altura mínima
 - copa máxima

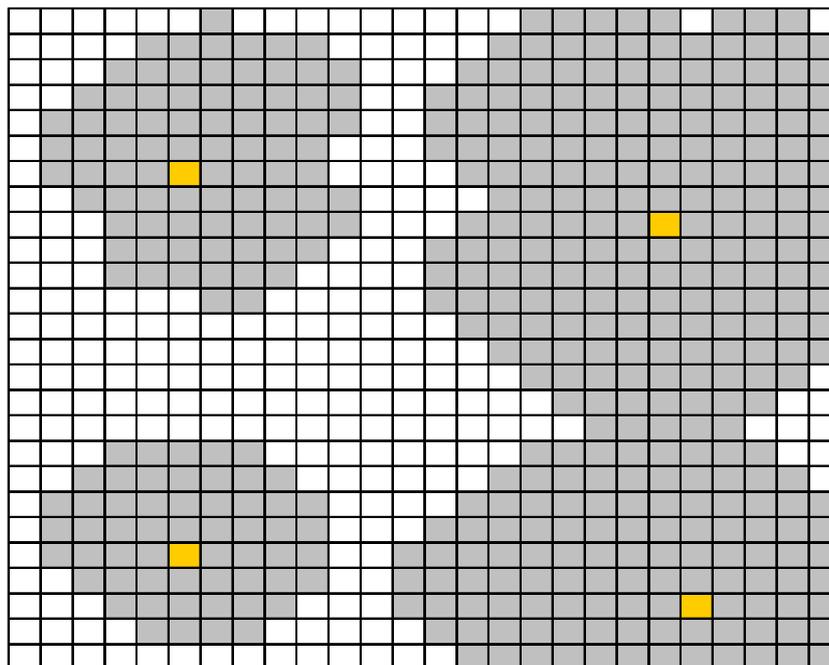


Figura 5.3 – Esquema ilustrativo da lógica de Crescimento por Região.

Na figura 5.4 é possível visualizar a tela de interface do algoritmo.

¹⁹ Equivalente ao tamanho máximo da área de copa mensurada em campo



Figura 5.4 – Interface do algoritmo implementado.

As saídas deste algoritmo são duas imagens (máximas locais e crescimento por região), como é possível ver na figura 5.5, e um arquivo tabular, contendo:

- Identificação da árvore;
- Coordenadas da árvore (linha,coluna);
- Altura total (m);
- Área de copa (m²).



Figura 5.5 – Duas imagens geradas pelo algoritmo. A) Máximas locais; B) Crescimento por região.

Os parâmetros dendrométricos extraídos foram validados utilizando-se as referências de campo e – especificamente para a quantidade de indivíduos arbóreos – um censo digital em fotografia aérea de alta resolução. Este censo é considerado mais preciso que as extrapolações dos dados medidos em parcelas, devido ao fato de ter sido realizado contagem árvore-a-árvore de três talhões inteiros, exemplificado na figura 5.6.

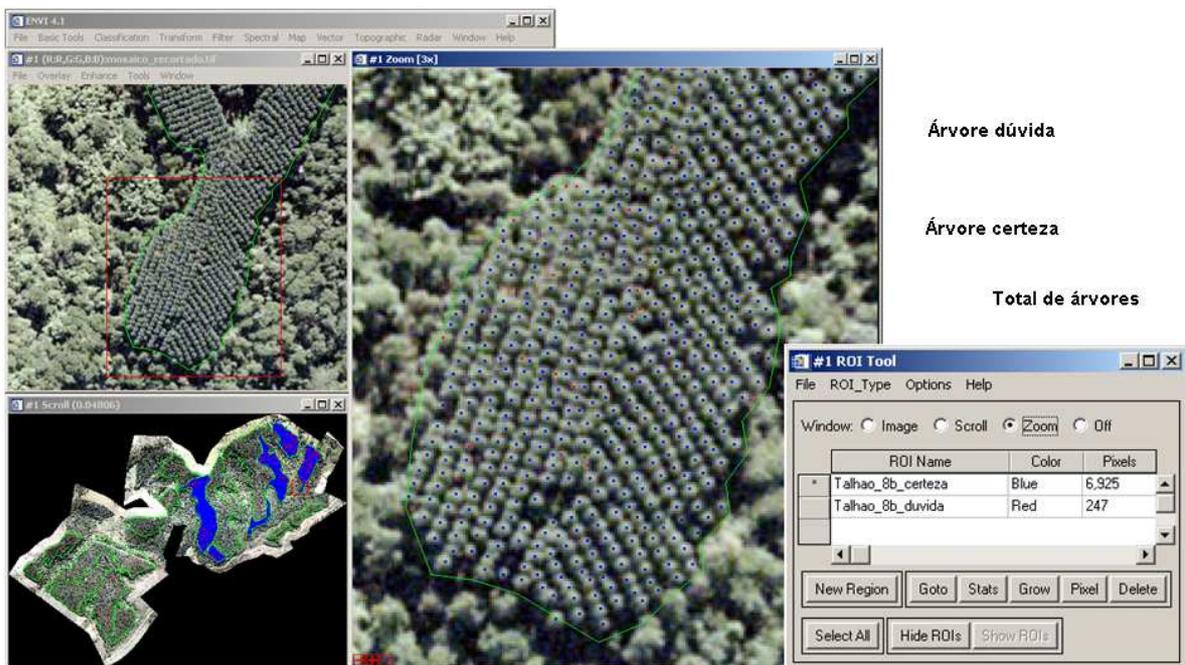


Figura 5.6 – Censo digital em fotografia aérea de alta resolução.

Para a comparação com os dados de campo, foram gerados polígonos referentes às parcelas, a partir da coordenada do vértice foi traçado manualmente o perímetro da parcela, utilizando-se fotografia aérea como apoio.

Após a validação das variáveis dendrométricas, estimou-se o volume através de equações volumétricas que consideraram DAP, altura total e fator de forma e equações volumétricas que consideraram área de copa e altura total somente, comparando-se os resultados com a estimativa volumétrica calculada estritamente com os dados de campo.

Programas

- IDL V. 7.0 – desenvolvimento de algoritmo para extração de variáveis dendrométricas;
- ArcGis V. 9.2 – recortes e mosaicos;
- Microsoft Office Excel 2003 – tabulação e análise dos dados.

Dados de Apoio

- Dados vetoriais referentes aos mapas das fazendas e arredores, em formato *shapefile*;
- Fotografias Aérea em escala 1:10.000, proveniente de aerolevanteamento de 2007.

Visando auxiliar na comparação entre as mensurações de campo e as estimativas do algoritmo, foram calculados o erro amostral, o intervalo de confiança e analisados os resíduos, como pode ser visto nas equações 5.1 e 5.2.

$$E = t.S_{\bar{y}} \quad (5.1)$$

Onde E =Erro Amostral; t =student tabelado; $S_{\bar{y}}$ =Desvio da média

Para o valor t , considerou-se 1,96 (95%) em todos os cálculos.

$$IC = \{ \bar{y} - t.S_{\bar{y}} \leq \mu \leq \bar{y} + t.S_{\bar{y}} \} \quad (5.2)$$

Onde IC =Intervalo de Confiança; \bar{y} =média

Após a extração da altura e área de copa, estimou-se o DAP a partir de equação de regressão linear, gerada com os dados medidos em campo e expressa na equação 5.3.

$$DAP = 0,5658.ht + 14,551 \quad (5.3)$$

Onde ht =altura total

Utilizando o DAP e a altura total, estimou-se o volume de cada árvore, através da equação 3.3. Também foi estimado o volume de cada árvore através de um modelo volumétrico que utiliza apenas altura total e área de copa, expresso nas equações 5.4 (HUMES e KIRCHNER, 2003).

$$V = \beta_0 + \beta_1.ht.\sqrt{AC} + \beta_2.ht.AC \quad (5.4)$$

onde: AC = Área de Copa; ht = Altura Total

De acordo com os autores citados, foi considerado o melhor modelo volumétrico com base nos seguintes critérios: i) Coeficiente de determinação (R^2); ii) Erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{xy}\%$); iii) Teste F; iv) Teste de comparação entre os coeficientes de correlação e; v) Significância dos coeficientes da equação.

5.3 Discussão dos resultados

Primeiramente, foram extraídas as variáveis quantidade e altura de árvores, através das máximas locais. A tabela 5.1 mostra a comparação entre os dados mensurados nas parcelas de campo e as estimativas do algoritmo, com $RMS = 187,12$ árvores por ha. A extrapolação da quantidade de árvores contidas na parcela por ha é realizada somente para ser comparável com outros conjuntos de dados.

Tabela 5.1 – Comparação entre quantidade de árvores mensuradas em parcelas de campo e estimadas via algoritmo.

Parcela	Estimativa (arv/ha)		Diferença (arv/ha)	Resíduos (%)
	Campo	Algoritmo		
1	1517	1567	50	3,31
2	1485	1536	51	3,44
3	1566	1800	234	14,97
4	1560	1560	0	0,01
5	1585	1720	135	8,51
6	1567	1619	52	3,32
7	1648	1758	110	6,69
8	1351	1636	285	21,08
9	1578	1986	408	25,86
10	1649	1924	275	16,68
11	1630	1824	194	11,88
12	1574	1626	52	3,30
13	1520	1417	-103	-6,80
14	1599	1651	52	3,25
15	1414	1725	311	22,00
17	1533	1775	242	15,78
18	1585	1557	-28	-1,74
19	1634	1661	27	1,67
20	1419	1467	48	3,36
21	1464	1220	-244	-16,68
Média	1544	1651	108	6,99
RMS (arv/ha)			186	

Considerando todas as parcelas medidas em campo, atingiu-se um percentual de erro de 7%, apresentando tendência de superestimativa da quantidade de indivíduos arbóreos, efeito direto do resultado do filtro de suavização, tamanho da janela de busca e/ou deslocamento da mesma. Foram plotados os resíduos por parcela, sem ajustes, expressando apenas as diferenças, apresentados na figura 5.7.

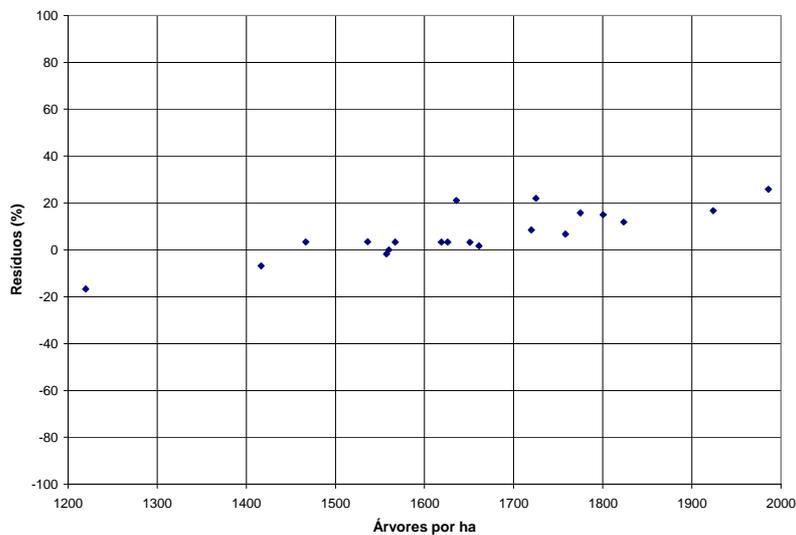


Figura 5.7 – Análise de resíduos de regressão da quantidade de árvores estimada via algoritmo.

Através da plotagem dos resíduos, é perceptível a tendência de superestimativa na quantidade de árvores. Visando auxiliar na comparação entre os dois tipos de medidas (campo x algoritmo), foi calculado o desvio da média, erro amostral e intervalo de confiança (95%) para os dois conjuntos de dados (figura 5.8).

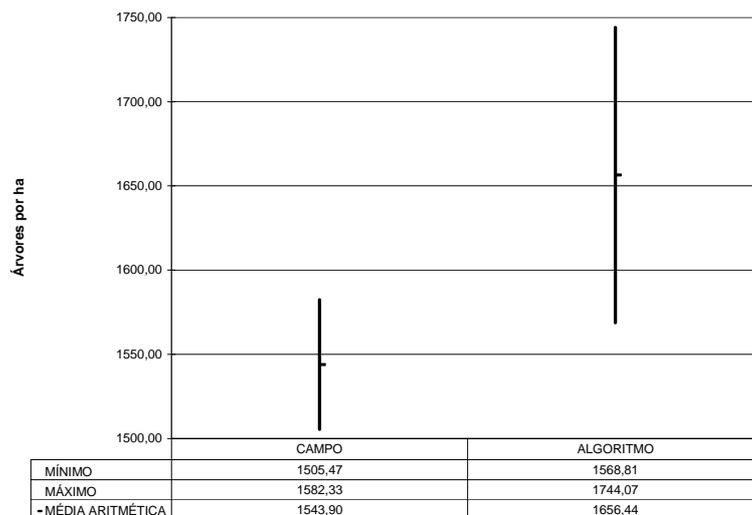


Figura 5.8 – Intervalos de confiança (95%) para a a quantidade de árvores mensuradas em campo e estimadas via algoritmo.

Os erros de estimativa para os dados de campo e para o algoritmo foram de 2,49 e 5,29, respectivamente ($t = 1,96$). Apesar da superestimativa, os intervalos de confiança são coincidentes, qualificando a estimativa como aceitável. Visando a enriquecer a análise, foi utilizada como referência a informação de quantidade de árvore obtida via censo digital. O resultado da comparação da estimativa do algoritmo obtido com estes dados está expresso na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Comparação entre quantidade de árvores mensuradas via censo digital e estimadas via algoritmo.

Talhão	Estimativa (arv/ha)		Diferença (arv/ha)	Resíduos (%)
	Censo	Algoritmo		
1	1280	1237	-43	-3,36
7	1194	1225	31	2,58
8	1305	1177	-128	-9,79
Média	1259	1213	-47	-3,52
RMS (arv/ha)				80

Diferentemente da comparação com as parcelas de campo, não houve tendência de superestimativa. Com erro de -3,52% e RMS calculado em 80 árvores por ha, os resultados foram considerados bons. Na figura 5.9 é possível verificar os intervalos de confiança (95%) entre os dois conjuntos de dados. A sobreposição dos intervalos de confiança expressa a aceitação da estimativa em relação ao censo.

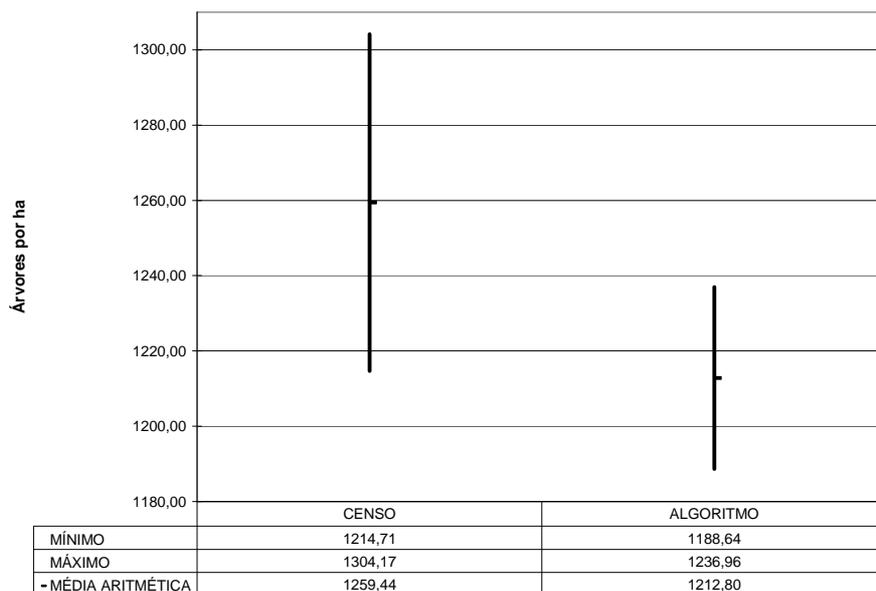


Figura 5.9 – Intervalos de confiança (95%) para a quantidade de árvores mensuradas via censo digital e estimadas via algoritmo.

Os erros de estimativa para o censo e para o algoritmo foram de 3,22 e 4,06, respectivamente ($t=1,96$). A diferença entre as referências – censo por fotografia aérea e a extrapolação da contagem via parcelas – pode ser explicada por diversos motivos, mas principalmente pela diferença na medida de área entre o cadastro florestal (base vetorial) e a realidade, que pode ser ocasionada por: estradas mais largas que as plotadas na base cartográfica; presença de parcelas experimentais em áreas indicadas como “efetivo plantio”; redução de área plantada devido a afloramentos rochosos ou mesmo presença de galhada (proveniente do ciclo anterior) no momento do plantio; influência da declividade, etc. Como esta diferença entre área cartográfica e área “real” é muito difícil de ser controlada, optou-se por adotar o censo via fotografia aérea como referência, aceitando a contagem através do algoritmo.

Realizou-se a comparação entre altura total e área de copa, mensuradas em campo e estimadas via algoritmo. A tabela 5.3 expressa os resultados.

Tabela 5.3 – Comparação entre altura/área de copa, mensuradas em campo e estimadas via algoritmo.

Parcela	Altura (m)		Diferença (m)	Resíduos (%)	Área de Copa (m ²)		Diferença (m ²)	Resíduos (%)
	Campo	Algoritmo			Campo	Algoritmo		
1	22,11	20,97	-1,14	-5,16	5,31	7,32	2,01	37,76
2	25,02	23,92	-1,10	-4,40	6,77	7,41	0,65	9,60
3	23,29	23,53	0,23	1,00	4,97	6,49	1,52	30,64
4	20,78	23,83	3,05	14,67	6,84	7,49	0,65	9,52
5	24,06	23,53	-0,52	-2,18	7,33	7,07	-0,26	-3,56
6	23,21	22,08	-1,13	-4,87	6,86	6,78	-0,08	-1,17
7	22,46	22,08	-0,38	-1,71	5,48	6,95	1,47	26,73
8	23,55	21,40	-2,15	-9,15	7,19	6,47	-0,72	-10,01
9	23,46	21,90	-1,56	-6,64	5,75	5,78	0,03	0,45
10	21,68	21,00	-0,67	-3,11	5,39	6,23	0,84	15,63
11	21,97	21,25	-0,72	-3,27	7,14	6,60	-0,54	-7,63
12	23,02	22,61	-0,40	-1,76	4,65	6,96	2,31	49,74
13	23,63	23,05	-0,58	-2,47	6,49	8,20	1,71	26,41
14	22,24	20,52	-1,73	-7,76	7,56	7,16	-0,40	-5,28
15	20,93	22,11	1,19	5,67	5,58	6,16	0,58	10,41
17	20,34	22,49	2,16	10,61	5,69	7,14	1,45	25,47
18	22,37	22,59	0,22	0,99	5,23	7,55	2,31	44,17
19	23,32	21,44	-1,88	-8,06	6,50	6,91	0,41	6,37
20	24,41	22,15	-2,26	-9,27	4,77	7,36	2,59	54,23
21	23,70	21,71	-1,99	-8,39	4,79	8,04	3,25	67,70
Média	22,78	22,21	-0,57	-2,26	6,01	7,00	0,99	19,36
RMS			1,48				1,49	

Considerando todas as parcelas medidas em campo, O RMS calculado foi de 1,48m para altura e 1,49m² para área de copa. Atingiu-se um percentual de erro de -2,26% para altura e 19,36% para área de copa, efeito direto do resultado do filtro de suavização e da dimensão da janela de busca. Foram plotados os resíduos por parcela, sem ajustes, expressando apenas as diferenças, cujos resultados estão apresentados nas figuras 5.10 e 5.11.

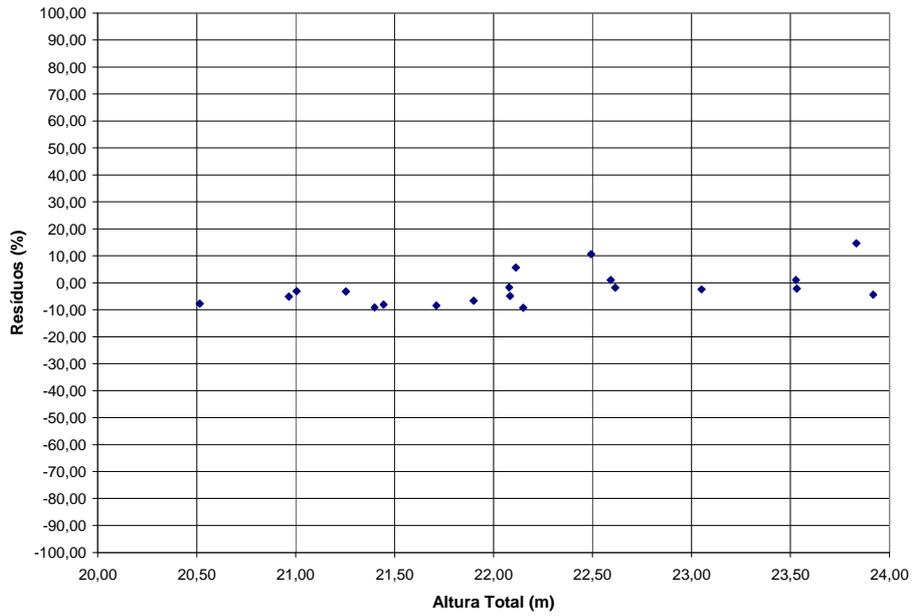


Figura 5.10 – Análise de resíduos de regressão da altura total estimada via algoritmo.

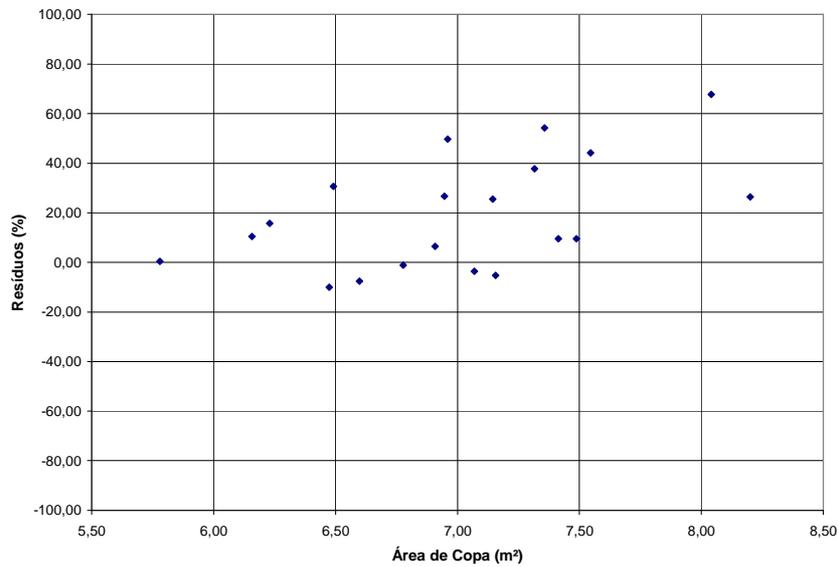


Figura 5.11 – Análise de resíduos de regressão da área de copa estimada via algoritmo.

Através da plotagem dos resíduos, é perceptível a assertividade quanto à altura e a necessidade de melhorias no algoritmo de crescimento por regiões. Somente a área de copa, a altura e o contato com a próxima copa (variáveis de entrada), talvez não sejam suficientes para gerar um polígono compatível com a copa real. Visando auxiliar na

comparação entre os dois tipos de medidas (campo x algoritmo), foram calculados o desvio da média, erro amostral e intervalo de confiança (95%) para os dois conjuntos de dados. As figuras 5.12 e 5.13 mostram os resultados.

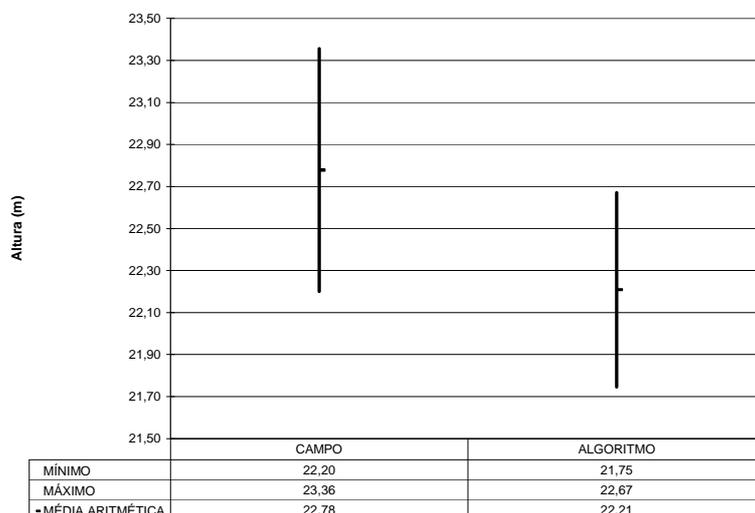


Figura 5.12 – Intervalos de confiança (95%) para a altura total mensuradas em campo e estimadas via algoritmo.

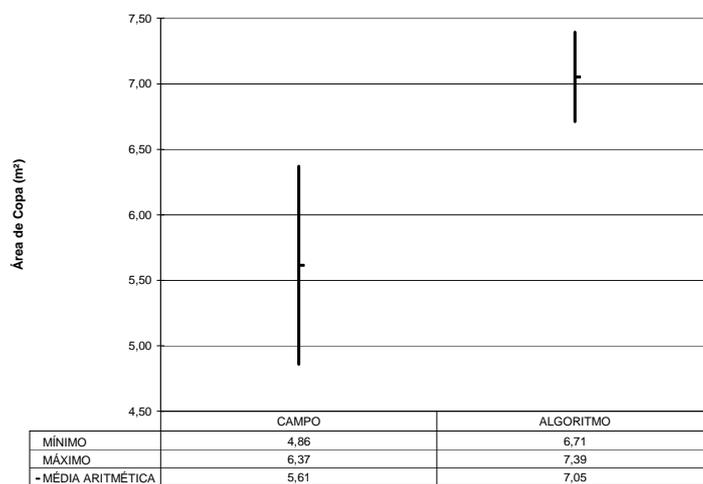


Figura 5.13 – Intervalos de confiança (95%) para a área de copa mensuradas em campo e estimadas via algoritmo.

Os erros de estimativa de altura total para os dados de campo e para o algoritmo foram de 2,54 e 2,08, respectivamente ($t=1,96$). E os de área de copa para os dados de campo e para o algoritmo foram respectivamente ($t=1,96$), de 13,46 e 4,83. Em relação à altura total, a estimativa através do algoritmo, possui intervalo de confiança similar à mensuração de campo, porém, em relação à área de copa, a estimativa é estatisticamente distinta da referência, impossibilitando sua aceitação.

A estimativa do DAP a partir dos dados LASER se deu a partir de sua relação com a altura total nos dados de campo, tal como se expressa na equação 5.3. A tabela 5.4 mostra a comparação entre os dois conjuntos de dados quanto ao índice de acerto, com $RMS = 1,01\text{cm}$.

Tabela 5.4 – Comparação entre DAP mensurados em campo e estimados a partir da altura total extraída via algoritmo.

Parcela	DAP (cm)		Diferença (cm)	Resíduos (%)
	Campo	Algoritmo		
1	14,19	14,29	0,10	0,70
2	14,04	15,64	1,59	11,35
3	14,31	15,46	1,15	8,05
4	14,35	15,60	1,25	8,71
5	13,75	15,46	1,71	12,44
6	13,51	14,80	1,29	9,57
7	13,77	14,80	1,02	7,43
8	14,65	14,49	-0,17	-1,13
9	13,06	14,71	1,66	12,71
10	13,40	14,31	0,91	6,76
11	14,67	14,42	-0,25	-1,71
12	14,58	15,04	0,46	3,17
13	14,96	15,24	0,28	1,88
14	13,57	14,08	0,51	3,77
15	15,60	14,81	-0,79	-5,05
17	13,55	14,99	1,44	10,60
18	13,83	15,03	1,20	8,69
19	13,74	14,51	0,77	5,59
20	14,87	14,83	-0,04	-0,26
21	14,17	14,63	0,46	3,27
Média	14,13	14,86	0,73	5,33
RMS (cm)			1,01	

Considerando todas as parcelas medidas em campo, atingiu-se um percentual de erro de 5,33% para DAP. Foram plotados os resíduos por parcela, sem ajustes, expressando apenas as diferenças, cujos resultados estão na figura 5.14.

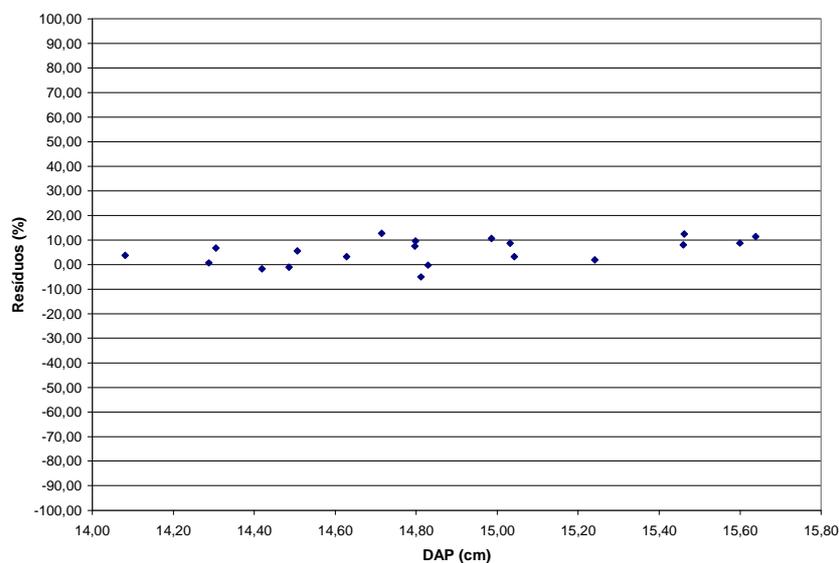


Figura 5.14 – Análise de resíduos de regressão do DAP estimado via algoritmo.

Através da plotagem dos resíduos, é possível perceber sua aleatoriedade, característica desejável. Visando auxiliar na comparação entre os dois tipos de medidas (campo x algoritmo), foram calculados o desvio da média, erro amostral e intervalo de confiança (95%) para o DAP. A figura 5.15 mostra os resultados.

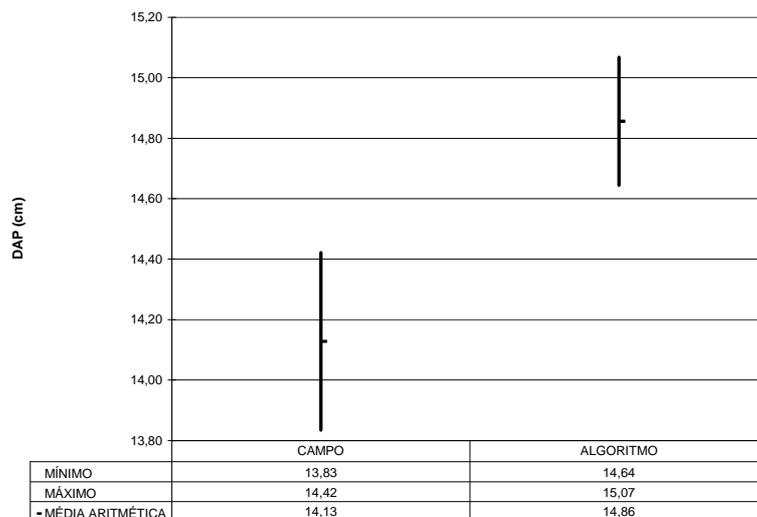


Figura 5.15 – Intervalos de confiança (95%) para o DAP mensurados em campo e estimados, a partir da altura total obtida via algoritmo.

Os erros de estimativa para os dados de campo e para o algoritmo foram de 2,08 e 1,42, respectivamente ($t=1,96$).

Após a extração das variáveis dendrométricas, estimou-se o volume de madeira, comparando-o com o volume calculado com dados de campo. O cálculo volumétrico foi realizado de duas maneiras:

1. Função de afilamento (*taper*), cujas variáveis de entrada são: DAP, altura total e fatores de forma;
2. Modelos fotogramétricos, cujas variáveis de entrada são: altura total e área de copa.

A tabela 5.5 mostra a comparação entre o volume estimado a partir dos dados de campo e a partir dos dados extraídos via algoritmo, utilizando-se função de afilamento.

Tabela 5.5 – Comparação entre volume por ha estimado a partir dos dados de campo e estimado com dados extraídos via algoritmo, utilizando função de afilamento.

Parcela	Volume (m ³ /ha)		Diferença (m ³ /ha)	Resíduo (%)
	Campo	Algoritmo		
1	230,86	197,23	-33,64	-14,57
2	267,67	260,73	-6,94	-2,59
3	263,54	288,42	24,88	9,44
4	240,90	258,53	17,64	7,32
5	177,87	267,66	89,79	50,48
6	232,25	222,72	-9,53	-4,10
7	238,08	229,85	-8,23	-3,46
8	234,90	231,63	-3,27	-1,39
9	215,08	275,67	60,59	28,17
10	223,61	224,16	0,55	0,25
11	262,30	216,75	-45,54	-17,36
12	275,39	239,73	-35,66	-12,95
13	289,51	218,88	-70,63	-24,40
14	234,28	193,88	-40,39	-17,24
15	260,76	259,56	-1,20	-0,46
17	194,35	248,09	53,74	27,65
18	219,70	216,62	-3,08	-1,40
19	247,58	205,31	-42,27	-17,07
20	260,95	224,61	-36,33	-13,92
21	240,78	172,56	-68,22	-28,33
Média	240,52	232,63	-7,89	-1,80
RMS (m³/ha)			41,62	

Considerando todas as parcelas medidas em campo, atingiu-se um percentual de erro de -1,8% com RMS de 41,62m³. Foram plotados os resíduos por parcela, sem ajustes, expressando apenas as diferenças, cujos resultados estão na figura 5.16.

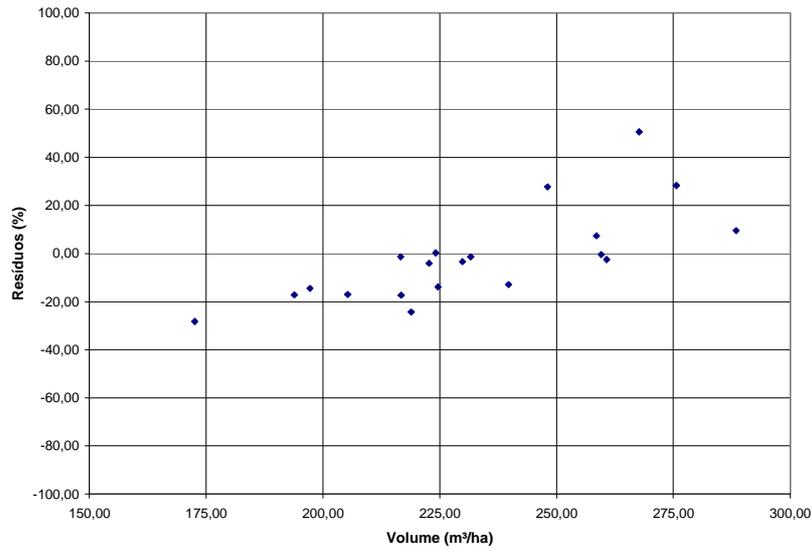


Figura 5.16 – Análise de resíduos de regressão do volume por ha obtido por função de afilamento utilizando-se os dados extraídos via algoritmo.

Através da plotagem dos resíduos, é possível verificar a aleatoriedade dos resíduos, característica desejável para o algoritmo. Visando auxiliar na comparação entre os dois tipos de medidas (campo x algoritmo), foram calculados o desvio da média, erro amostral e intervalo de confiança (95%) para os dois conjuntos de dados. A figura 5.17 mostra os resultados.

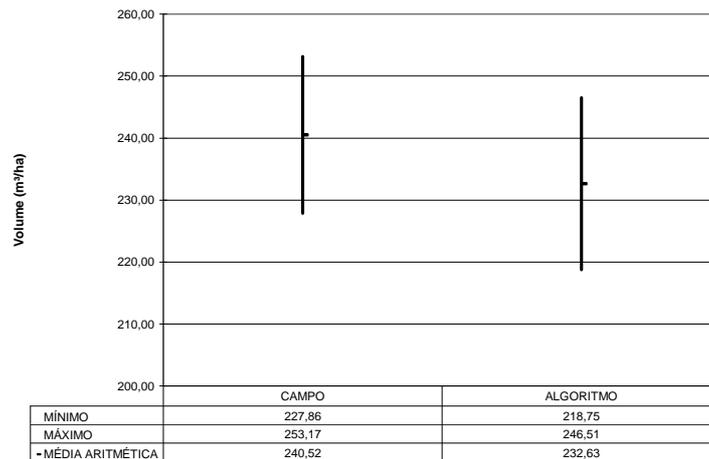


Figura 5.17 – Intervalos de confiança (95%) para o volume de madeira estimado com dados de campo e estimado com dados extraídos via algoritmo, por função de afilamento.

Os erros de estimativa para os dados de campo e para o algoritmo foram de 5,26 e 5,97, respectivamente ($t=1,96$). Os intervalos de confiança são coincidentes, qualificando a estimativa volumétrica como aceitável.

A tabela 5.6 mostra a comparação entre o volume estimado a partir dos dados de campo e a partir dos dados extraídos via algoritmo, utilizando-se função volumétrica oriunda da fotogrametria.

Tabela 5.6 – Comparação entre volume por ha estimado a partir dos dados de campo e estimado com dados extraídos via algoritmo, utilizando equação volumétrica oriunda da fotogrametria.

Parcela	Volume (m ³ /ha)		Diferença (m ³ /ha)	Resíduo (%)
	Campo	Algoritmo		
1	230,86	214,99	-15,87	-6,87
2	267,67	236,11	-31,55	-11,79
3	263,54	262,10	-1,43	-0,54
4	240,90	233,89	-7,01	-2,91
5	177,87	247,11	69,24	38,93
6	232,25	227,34	-4,91	-2,11
7	238,08	236,09	-1,99	-0,84
8	234,90	239,73	4,83	2,06
9	215,08	277,52	62,44	29,03
10	223,61	242,68	19,08	8,53
11	262,30	230,01	-32,29	-12,31
12	275,39	230,04	-45,35	-16,47
13	289,51	210,12	-79,39	-27,42
14	234,28	224,84	-9,43	-4,03
15	260,76	262,41	1,65	0,63
17	194,35	246,44	52,09	26,80
18	219,70	213,18	-6,52	-2,97
19	247,58	212,29	-35,29	-14,25
20	260,95	226,79	-34,16	-13,09
21	240,78	173,20	-67,58	-28,07
Média	240,52	232,34	-8,17	-1,88
RMS (m³/ha)			38,49	

Considerando todas as parcelas medidas em campo, atingiu-se um percentual de erro de -1,88% com RMS de 38,49m³/ha. Resultados bastante semelhantes aos obtidos pela

função de afilamento. Foram plotados os resíduos por parcela, sem ajustes, expressando apenas as diferenças, cujos resultados estão na figura 5.18.

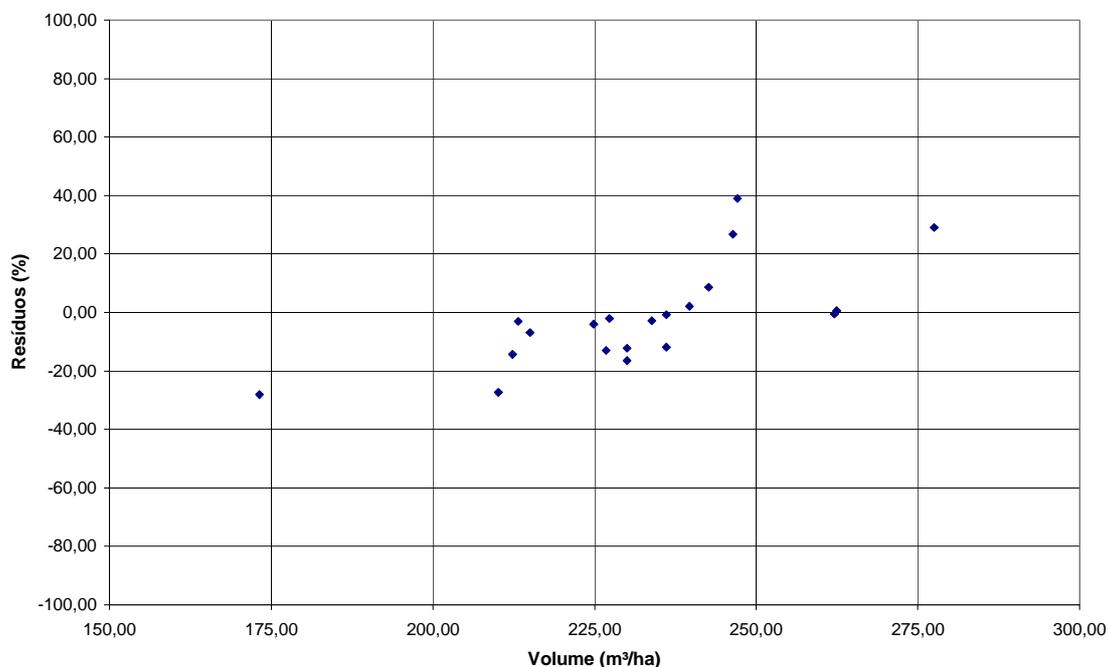


Figura 5.18 – Análise de resíduos de regressão do volume por ha obtido por equação volumétrica utilizada em fotogrametria, com os dados extraídos via algoritmo.

Através da plotagem dos resíduos, é possível verificar a aleatoriedade dos resíduos, característica desejável para o algoritmo. Visando auxiliar na comparação entre os dois tipos de medidas (campo x algoritmo), foram calculados o desvio da média, erro amostral e intervalo de confiança (95%) para os dois conjuntos de dados. A figura 5.19 mostra os resultados.

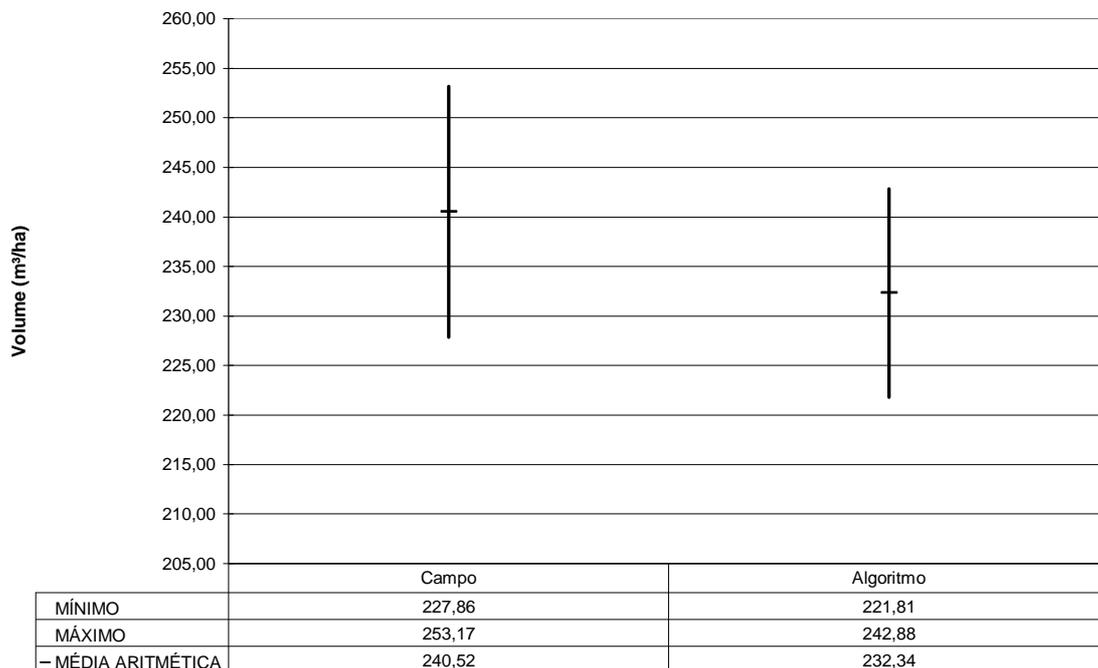


Figura 5.19 – Intervalos de confiança (95%) para o volume de madeira estimado com dados de campo e estimado com dados extraídos via algoritmo, por equação volumétrica utilizada em fotogrametria.

Os erros de estimativa para os dados de campo e para o algoritmo foram de 5,26 e 4,53, respectivamente ($t=1,96$). Os intervalos de confiança são coincidentes, qualificando a estimativa volumétrica como aceitável.

Graças à acurácia da estimativa de altura total, ambas as estimativas volumétricas apresentaram aceitabilidade. Na função de afilamento, o DAP é estimado a partir da altura total e, na equação volumétrica que substitui o DAP por área de copa, a altura total possui um peso significativamente maior na estimativa. Em virtude da tendência de subestimativa da altura total e superestimativa do DAP e área de copa, a estimativa volumétrica se manteve dentro dos padrões de aceitabilidade.

Considerações Finais

Os avanços em aplicações de *laserscanner* para obtenção e estimativa de variáveis dendrométricas têm proporcionado acurácia cada vez melhor. Além disso, tal como

todos os pesquisadores recomendaram em seus artigos, estão ocorrendo integrações entre dados LASER e dados de outros sensores, tais como ETM+ (HUDAK et al, 2002), MISR (KIMES et al, 2006), IKONOS (DONOGHUE e WATT, 2006), sensores fotogramétricos (SUÁREZ et al, 2005; VÉGA e ST-ONGE, 2008), CASI (LUCAS et al, 2008) e InSAR (BALZTER et al, 2007; WALKER et al, 2007). A utilização dos dados de intensidade juntamente com as variáveis XYZ também é promissora (DONOGHUE et al, 2007). À medida que os sensores com feixe largo e registro de fase, tornarem-se comerciais, haverá vantagens para a detecção do piso florestal, do topo das árvores e caracterização de sub-bosques e árvores dominadas. Outra melhoria é o fato dos trabalhos atuais considerarem a árvore individualmente – e não somente a parcela ou o talhão. Uma demanda ainda existente é a implementação em programas comerciais, de rotinas computacionais necessárias à detecção e mensuração de variáveis dendrométricas.

A partir da análise dos dados foi possível verificar que apesar do algoritmo subestimar a quantidade de árvores e a altura, e superestimar a área de copa e o DAP, a estimativa volumétrica manteve-se dentro de um intervalo aceitável, tanto em termos de intervalo de confiança, quanto em erro amostral. Provavelmente, os resultados podem ser aprimorados utilizando-se outros filtros de suavização e alterando-se o processo de definição dos pontos sementes, tais como forma e tamanho da janela de busca.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados apresentados nos capítulos 4 e 5, aceita-se a hipótese inicial, ou seja, a estimativa volumétrica realizada com dados obtidos via *laserscanner* aerotransportado é compatível com a estimativa proveniente do inventário florestal tradicional. Apesar de haver erros referentes ao DAP e à área de copa, as estimativas volumétricas não apresentaram diferenças significativas, mantendo-se o erro amostral tolerável (em torno de 5%) e o intervalo de confiança sobreposto à estimativa tradicional, indicando similitude nos resultados.

Os objetivos propostos foram atingidos, chamando-se a atenção para a diferença entre o MDT gerado e a referência de campo, exceder os 0,15m de erro altimétrico nominal. Fato esperado em uma área florestal com relevo ondulado e presença de diversos elementos perturbadores no micro-relevo, tais como galhos, troncos, buracos, sulcos, etc. Neste trabalho não se buscou avaliar os algoritmos de filtragens de pontos e geração de MDT's, por serem certamente fontes de erros relevantes que interferem diretamente no MDA e conseqüentemente, na extração dos parâmetros dendrométricos.

O erro final de inventário é o somatório de erros gerados em todos os processos. Sabe-se que a base cartográfica/topográfica influencia sensivelmente no erro final de inventário. Os produtos obtidos via aerolevanteamento com *laserscanner*, ao inserir precisão e acurácia nas medidas de área e declividade, contribuem intensamente na coerência das extrapolações (árvores por ha, volume por ha). Apesar das limitações presente no algoritmo implementado, os resultados são promissores e demonstram a viabilidade técnica da adoção de *laserscanner* aerotransportado para a realização de inventário florestal, mapeamento e levantamento topográfico, principalmente por viabilizar a automação de grande parte do processo, tornando-o mais objetivo e controlável.

Recomenda-se o aprimoramento e otimização do algoritmo implementado e o estudo de outras abordagens para a extração de variáveis dendrométricas a partir de dados LASER, incluindo povoamentos de diversas idades e de distintos índices de sítio. A utilização da fotografia aérea de alta resolução que acompanha o sensor em processos de classificação orientada a objetos é extremamente vantajosa, principalmente na delimitação das copas.

Sugere-se uma avaliação econômica do uso desta tecnologia no setor florestal, contemplando a cadeia de custos do planejamento florestal como um todo, ou seja, cartas temáticas (estradas, hidrografia, curvas de nível, áreas de preservação permanente, reserva florestal legal, outras fisionomias), planejamento de estradas, de corte/baldeio, atualização cadastral de informações como área, declividade e perímetro e, inventário florestal. A viabilização econômica está atrelada a esta mudança de paradigma no planejamento florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, S. O uso de equações de forma de tronco em inventários florestais. EMBRAPA/URPFCS. Curitiba/PR (p. 115-120). In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 2. 1984. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1984, 131p.
- ALLEN, L. Essentials of LASERs. **Selected readings in physics**. Oxford, London: Pergamon Press: 1969. 233p. p.3-7.
- ANDRADE-LIMA, D. de,. Vegetação. In: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística & Conselho Nacional de Geografia, ed. – **Atlas nacional do Brasil**. Rio de Janeiro, IBGE/CNG. Folha II-11, 1966
- ASSUNÇÃO, M. G. T.; BOTELHO, M. F.; CENTENO, J. A. S.; PACHECO, A. P. Filtragem e classificação de pontos LIDAR para a geração de Modelo Digital do Terreno. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3681-3688. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.45>>. Acesso em: 14 dez. 2008
- AVERY, T. E. **Forest measurements**. New York: McGraw-Hill, 1967. 290p.
- AXELSSON, P. Processing of laser scanner data/algorithms and applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2/3, p. 138-147, 1999.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne LASER Scanning: Basic Relations and Formulas, **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, n. 2/3, p. 199–214,1999a.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, n. 2/3, p.164–198, 1999b.

BALZTER, H.; LUCKMAN, A.; SKINNER, L.; ROWLAND, C.; DAWSON, T. Observations of forest stand top height and mean height from interferometric SAR and LiDAR over a conifer plantation at Thetford Forest, UK. **International Journal of Remote Sensing**. v. 28, n. 6, p. 1173-1197, 2007.

BEHAN, A. On the Matching Accuracy of Rastering Scanning Laser Altimeter Data. **ISPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 2000.

BEHERA, M. D.; ROY, P. S. Lidar remote sensing for forestry applications: The Indian context. **Current Science**, v. 83, n. 11, p. 1320 – 1329, 2002.

BEVEN, K. J. **User's guide to the distributions versions** Lancaster University, 1995. v. 110, n. 2. 26p. CRES Technical Report.

BLAIR, J. B., COYLE, D. B., BUFTON, J. L., HARDING, D. J. Optimization of an airborne laser altimeter for remote sensing of vegetation and tree canopies. In **Remote Sensing Symposium**, 2. 1994. p. 938–941.

BRANDTBERG, T.; WARNERA, T.; LANDENBERGERB, R. E.; MCGRAWB, J. B. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. **Remote Sensing of Environment**, v. 85,p. 290–303, 2003.

BRASIL. **Levantamento e reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo**. Boletim n. 12. Rio de Janeiro. Ministério da Agricultura, 1960.

BUFTON, J.L., GARVIN, J.B., CAVANAUGH, J.F., RAMOS-IZQUIERDO, L., CLEM, T.D., KRABILL, W.B.,. Airborne lidar for profiling of surface topography. **Opt. Eng.**, v. 30, p. 72–78, 1991.

CANDREVA, C. F.; REGO, M. L.; RAIOL, R. F.; LOPES, R. R. **Introdução à teoria LASER**. Rio de Janeiro/RJ,1983. 110p.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Curitiba:UFPR – Departamento de Geomática, 2003.

CHIARINI, J. V. & COELHO, A. G. S. Cobertura vegetal natural e áreas reflorestadas do Estado de São Paulo. Campinas. **Boletim do Instituto Agrônomo**, n. 193, 1969.

COUTO, H. T. Z. Sistemas Integrados de Levantamentos Florestais. Esalq,USP. Piracicaba/SP. p. 121-127. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 2. 1984. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1984, 131p.

CRACKNELL, A. P.; HAYES, L. W. B. **Remote sensing yearbook**. London:Taylor & Francis, 1987. 690p.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema LASERscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. 3. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003. 97p.

DIEDERSHAGEN, O.; KOCH, B.; WEINACKER, H. Automatic Segmentation And Characterisation of Forest Stand Parameters Using Airborne Lidar Data, Multispectral and Fogis Data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial Information Sciences**, v. 34, Amsterdam, 2000.

DONOGHUE, D. N. M.; WATT, P. J. Using LiDAR to compare forest height estimates from IKONOS and Landsat ETM+ data in Sitka spruce plantation forests. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 11, p. 2161-2175,2006.

DONOGHUE, D. N. M.; WATT, P. J.; COX, N. J.; WILSON, J. Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, p. 509-522, 2007.

DUBAYAH, R. O.; KNOX, R. G.; HOFTON, M. A.; BLAIR, J. B.; DRAKE, J. B. Land surface characterization using LiDAR remote sensing. In: HILL, M.; ASPINALL, R. (Ed.). **Spatial information for land use management**. Singapore: International Publishers Direct, p. 25-38, 2000.

DUBAYAH, R.; O. DRAKE, J. B. Lidar Remote Sensing for Forestry Applications, **Journal of Forestry**, v. 98, n. 6, p. 44-46, 2000.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

ESTADO DE SÃO PAULO. Atlas do zoneamento econômico do Estado de São Paulo, mapas 9 e 23. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, n. 17, 1975.

ESTADO DE SÃO PAULO. **Zoneamento agrícola do Estado de São Paulo**. v. 1. São Paulo. Secretaria da Agricultura, dez., 1974. 169p.

FERREIRA, M. Z. **Estudo de funções de afilamento para representar o perfil e o volume do fuste de *Pinus taeda* I**. Dissertação de mestrado. Lavras/MG, 2004.

FIALA, A. C. S.; GARMAN, S. L.; GRAY, A. Comparison of five canopy cover estimation techniques in the western Oregon Cascades. **Forest Ecology and Management**, v. 232. p.188–197, 2006.

FOWLER, R. A. The low down nn lidar. **EOM (Earth Observation Magazine)**. March 2000.

FRIEDLAENDER, H.; KOCH, B. First Experience In The Application of Laserscanner Data for the Assessment of Vertical and Horizontal Forest Structures. **IAPRS**, v. 33, Amsterdam, p. 693, 2000.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. Curitiba/PR:UFPR, 1994.

GOUGEON, F. Automatic individual tree crown delineation using a valley-following algorithm and a rule-based system. In: INTERNATIONAL FORUM ON AUTOMATED INTERPRETATION OF HIGH SPATIAL RESOLUTION DIGITAL IMAGERY FOR FORESTRY, 1998, Victoria, BC. **Proceedings...** Victoria B. C. Pacific Forestry Centre, 1998.

HARRY, A. A. **A planning model for forest inventories based on combined photo and ground sampling methods**. Tese de doutorado. Berkeley, CA, 1971. 122p.

HUDAK, A. T.; LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; ERTERRRETICHE, M. B. Integration of lidar and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, p. 397-416, 2002.

HUECK, K. **Problemas e importância prática da fitossociologia no Estado de São Paulo**. (Contribuição para a pesquisa fitossociológica paulista I). São Paulo: Instituto de Botânica, 1972.

HUMMES, A. P.; KIRCHNER, F. F. Estimativa volumétrica de árvores individuais de *Pinus taeda* L. utilizando aerofotos de câmera digital de pequeno formato calibrada. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11 (SBSR), 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2763 – 2770. CD-ROM

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. Canadá: John Wiley & Sons 3a Ed. 1982. 337p.

HYYPPE, J.; HALLIKAINEN, M. Applicability of Airborne Profiling Radar to Forest Inventory. **Remote Sensing of Environment**, v. 57, p. 39-57, 1996.

JONAS, D.; BYRNE, P. Extension of topographical modelling capability with airborne laser scanning. In: SOUTH EAST ASIAN SURVEYORS CONGRESS FREMANTLE, 6., 1999, Western Austrália. **Proceedings...** Western: 1 – 6 November. 1999

KALOGIROU, V. **Simulation of Discrete-return LiDAR signal from conifer stands for forestry applications**, MSc Thesis (University of London MSc in Remote Sensing), University College London, 2006.

KATZENBEISSER, R. **Echo Detection**. 1999. Technical Note. Disponível em: <http://www.toposys.de/pdf-ext/Engl/echo-detec3.pdf> Acesso em: 13 maio 2009.

KATZENBEISSER, R. **Intensity**. 2002. 5p. Technical Note. Disponível em: <http://www.toposys.de/pdf-ext/Engl/TN-Intensity.pdf> Acesso em 13 maio 2009.

KIMES, D. S.; RANSON, K. J.; SUN, G.; BLAIR, J. B. Predicting lidar measured forest vertical structure from multi-angle spectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 503-511, 2006.

KINI, A.; POPESCU, S. C. TreeVaW: a versatile tool for analyzing forest canopy LIDAR data: A preview with an eye towards future. In: ASPRS 2004 FALL CONFERENCE, 2004, Kansas City, Missouri. **Proceedings...** Kansas: ASPRS, 2004. 1 CD-ROM.

KORHONEN, L.; KORHONEN, K. T.; RAUTIAINEN, M.; STENBERG, P. Estimation of Forest Canopy Cover: a Comparison of Field Measurement Techniques. **Silva Fennica**, v. 40, n. 4, 577-588, 2006.

KWAK, D.; LEE, W. ; LEE, J.; BIGING, G. S.; GONG, P. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. **J For Res**, v. 12, p. 425–434, 2007.

LACTEC. **Especificações técnicas do sistema ALTM 2050**. Documento Técnico. 2007.

LAM, N. S. Spatial interpolation methods: A review. **The American Cartographer**, v. 10, n. 2, p. 129-149, 1983.

LANG, S.; TIEDE, D.; MAIER, B.; BLASCHKE, T. Análise 3D da estrutura da floresta com dados ópticos e LIDAR. **Ambiência. Revista do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais**, v 2. Edição Especial 1, 2006. Unicentro. Universidade Estadual do Centro-Oeste. p. 95-110.

LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; ACKER, S. A.; PARKER, G. G.; SPIES, T. A.; HARDING, D. LiDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 70. p. 339–61, 1999.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 3, p.301-310, 2003.

LENGYEL, B. A. **LASERs. Generations of light by stimulated emission**. USA: John Wiley & Sons, 1962, 125p.

LEPSH, I. F.; OLIVEIRA, J. B. Explicações sumárias sobre a nova nomenclatura das legendas de mapas pedológicos de São Paulo. **Boletim Técnico**, n. 117, Campinas, Instituto Agrônômico, 1987.

LEVINE, A. K. (ed.); DEKKER, M. **LASERs. A series of Advances**. v. 1. p.1-9, New York, 1966. 365p.

LEWIS, P.; HANCOCK, S. **LiDAR for vegetation applications**. London, UK: UCL, Gower St., 2007.

LILLESAND, T. M.; KIEFFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 724 p.

LIM, K., TREITZ, P., WULDER, M., ST-ONGE, B. and FLOOD, M. Lidar remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography**, v. 27, p. 88–106, 2003

LOETSCH, F.; HAALER, K. E. **Forest inventory**. v. 2. Munique: BVL Verlagsgesellschaft mbh, 1973.

LOETSCH, F.; HALLER, K. E.; ZÖHRER, F. **Forest Inventory**. Inventory data collected by terrestrial measurements and observations. Data processing in Forest Inventory. The sample Plot. Plotless. Sampling and Regeneration Survey. List Sampling with Unequal probabilities and planning. Performance and Field checking of forest inventories. v.2, 1973. 472p.

LÖHR, U. EIBERT, M. **The toposys laser scanner-system**. 1999.
<http://www.ifp.uni.stuttgart.de/publications/phowo/lohr.pdf> acessado em abril de 2007.

LONG, R. G. O Vale Médio do Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia** v. 15, n.3. p. 385-476. 1953

LUCAS, R. M.; LEE, A. C.; BUNTING, P. J. Retrieving forest biomass through integration of CASI and LiDAR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p 1553-1577, 2008.

MARTIN, J. What Is Basal Area? **Forestry Facts**, n. 43. University of Wisconsin, United States Department of Agriculture, 1989.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction.** Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 350 p.

MEASURES, R. M. **LASER remote sensing.** Fundamentals and Applications. New York: John Wiley & Sons, 1984, 510p.

MOLION, L. D. B. **O clima de São José dos Campos.** São José dos Campos: INPE. 1975. Mimeografado.

PARKER, G. G., LEFSKY, M. A.; HARDING, D. J. Light transmittance in forest canopies determined using airborne laser altimetry and in-canopy quantum measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 76,p. 298–309, 2001.

PERSSON, A.; HOLMGREEN, J.; SÖDERMAN, U. Detecting and measuring individual tree using an airborne laser scanner. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, p. 925-932, 2002.

PHILIP, M. S. **Measuring trees and forests: a textbook written for students in Africa.** Aberdeen. Grã-Bretanha: University Press, 1983. 338p.

PIMENTEL, V. T. F. **Uso de técnicas de interpretação de imagens na contagem das copas das árvores em plantios de eucalipto.** Universidade Federal de Lavras. Lavras/MG. 2008. 21p. Relatório final de estágio.

POPESCU, S. C. **Estimating plot-level forest biophysical parameters using small-footprint airborne lidar measurements.** 115p.Tese de Doutorado. Blacksburgh, Virginia. 2002.

POPESCU, S. C.; ZHAO, K. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 767–781,2008.

REES, W. G. **Physical Principles of Remote Sensing**. Cambridge: University Press. 1990. p. 131-135.

RIZZINI, C. T. Nota prévia sobre a divisão fitogeográfica (florístico-sociológica) do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**. v. 25, n. 1, p. 3-64, 1963.

ROBERTS, S. D.; DEAN, T. J.; EVANS, D. L.; MCCOMBS, J. W.; HARRINGTON, R. L.; GLASS, P. A. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions. **Forest Ecology and Management**, v. 213, p. 54–70, 2005.

ROSE, S. J. LASER Interaction With Matter. EUROPEAN CONFERENCE, 23., 1995, Oxford. **Proceedings...** Oxford: St. John's College, 1995. 475p. p. 19-23.

SALLEM FILHO, S.; BONATTO, A. Experiências práticas do sistema ALTM em áreas de floresta e outras aplicações. In: Seminário de atualização em sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas aplicados a engenharia florestal, 7, 2006, Curitiba/PR. **Anais...** p. 180-192.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Metodologias para Determinação de Biomassa Florestal (p. 77-94). In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILLIOTTO, M. A. (Eds.) **Fixação de carbono: atualidade, projetos e pesquisas**. Curitiba/PR: [s.n], 2004. 205p.

SCHAFER, A. G.; LOCH, R. E. N. Aplicação dos dados do sensor LASERscanner para modelagem do terreno visando projetos rodoviários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 749-756. CD-ROM

SCHMIDT, M. A. R.; CENTENO, J. A. S.; STEINLE, E.; GONÇALVES, R. M. Ferramenta de simulação de dados laser scanning para o sistema toposys. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007,

Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3677-3679. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em:

<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.45>>. Acesso em: 14 dez. 2008.

SCHNADT, K.; KATZENBEIßER, R. Unique Airborne Fiber Scanner Technique For Application-Oriented Lidar Products. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36I – 8/W2. p.19 – 23, 2005.

SCHRENDER, H. T.; GREGOIRE, T. G; WOOD, G. B. **Sampling methods for multiresource forest inventoy**. USA, 1993. 446p.

SERRA FILHO, R.; CAVALLI, A. C.; GUILLAUMON, J. R.; CHIARINI, J. V.; NOGUEIRA, F. P.; IVANCKO, C. M. A. M.; BARBIERI, J. L.; DONZELI, P. L.; COELHO, A. G. S.; BITTENCOURT, I. Levantamento da cobertura natural e reflorestamento no Estado de São Paulo. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, v. 11. p. 1-54, 1974.

SILVA, A. F. da. **Composição florística e estrutura fitossociológica do estrato arbóreo da Reserva Florestal Professor Augusto Ruschi, São José dos Campos, SP**. Tese de doutorado. Unicamp, Campinas, SP. 1989. 162p.

SITHOLE, G.; VOSSSELMAN, G. **Comparison of Filters**. Report: ISPRS Commission III, Working Group 3. 2003. 29p.

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

SMITH, W. V.; SOROKIN, P. P. **The LASER**. New York: McGraw-Hill, 1966. 498p. p.2-19.

SORRENTINO, A. **Manual teórico-prático. técnicas e instrumentos de medição forestal**. v. 1. Cátedra de Dasometria. Uruguay: Universidad de la Republica. Facultad de Agronomía. Departamento Forestal. 1986. 100p.

SPURR, S. H. **Forest inventory**. New York: Ronald Press, 1952. 476p.

STITCH, M. L. **LASER handbook**. v. 3. New York: North-Holland, 1979. 878p.

ST-ONGE, B.; JUMELET, J.; COBELLO, M.; VÉGA, C. Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar. **Canadian Journal for Remote Sensing**, v. 34, p. 2122–2130, 2004

STUMPF, K. A. The estimation of forest vegetation cover descriptions using a vertical densitometer. In: JOINT INVENTORY AND BIOMETRICS WORKING GROUPS SESSION AT THE SAF NATIONAL CONVENTION, 1993, Indianapolis, IN. **Proceedings...** Indianápolis, 1993.

SUÁREZ, J. C.; ONTIVEROS, C.; SMITH, S.; SNAPE, S. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. **Computers & Geosciences**, v. 31, p. 253-262, 2005.

SVELTO, O.; HANNA, D. C. **Principles of LASERs**. 4. ed. New York: Springer Science Media Inc., 1998 (1976), 604p. p.463-492.

TEMBA, P.; PHILIPS, J. Análise da propagação de covariância na zona de sobreposição lateral de faixas de aerolevanteamento com o ALS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3689–3691. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em:
<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.45>>. Acesso em: 14 dez. 2009.

TIEDE, D.; LANG, S.; HOFFMANN, C. Supervised and forest type-specific multi-scale segmentation for a one-level-representation of single trees. In: International Archives of Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36-4, n. C42,2006.

TROPPEMAIR, H. Ecosistemas e geossistemas do Estado de São Paulo. **Boletim de Geografia Teórica**, v. 13, n. 25, p. 27-36, 1983.

VÉGA, C.; ST-ONGE, B. Height growth reconstruction of a boreal forest canopy over a period of 58 years using a combination of photogrammetric and lidar models. **Remote Sensing of Environment**, v. 112. p. 1784-1794, 2008.

VEIGA, R. A. de A. **Cálculo de volume; determinação do fator de forma**. Brasil. Secretaria de Estado dos Negócios da Agricultura. Instituto Florestal. Publicação n. 18, 1978. 30p.

VEIGA, R. A. de A. Elaboração de tabelas de rendimento e de volume individual. **Silvicultura**. São Paulo, v. 6, p. 167-171, 1967.

VEIGA, R. A. de A. Uso de Equações de Volume em Levantamentos Florestais. FCA/UNESP – Departamento de Agricultura e Silvicultura – Botucatu/SP (p. 93-102). In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 2. 1984. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1984, 131p.

VEIGA, R. A. de A. **Zoneamento Econômico Florestal do Estado de São Paulo**. Boletim Técnico, n. 17. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria da Agricultura. Coordenamento de Pesquisa de Recursos Naturais. Instituto Florestal. 1975. 80p.

VELOSO, H.P. **Atlas florestal do Brasil**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura. 1966.

VERAS, R. de C. **Topografia**. roteiro para cálculo de uma poligonal. Método Analítico. Teresina/PI: Universidade Federal do Piauí, 1997. 52p.

WAGNER, M. J. Seeing 3D without the glasses. **Earth Observation Magazine**. July. p. 51 – 53. 1995

WALKER, W. S.; KELLNDORFER, J. M.; LAPOINT, E.; HOPPUS, M.; WESTFALL, J. An empirical InSAR-optical fusion approach to mapping vegetation canopy height. **Remote Sensing of Environment**, v. 109. p. 482-49, 2007.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 68–82, 1999.

WEHR, A.; LOHR, U.; BALTSAVIAS, E. Theme Issue on Airborne Laser Scanning (Editorial). **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p.61–63, 1999.

WIECHERT, A. Production of ALS and RGB/CIR true ortho images. **GIS Development**, v. 8, n. 5, p. 30-32, 2004.

WRIGHT, J. **Ground and air survey for field scientists**. . Oxford: Clarendon Press, 1982. 327p.

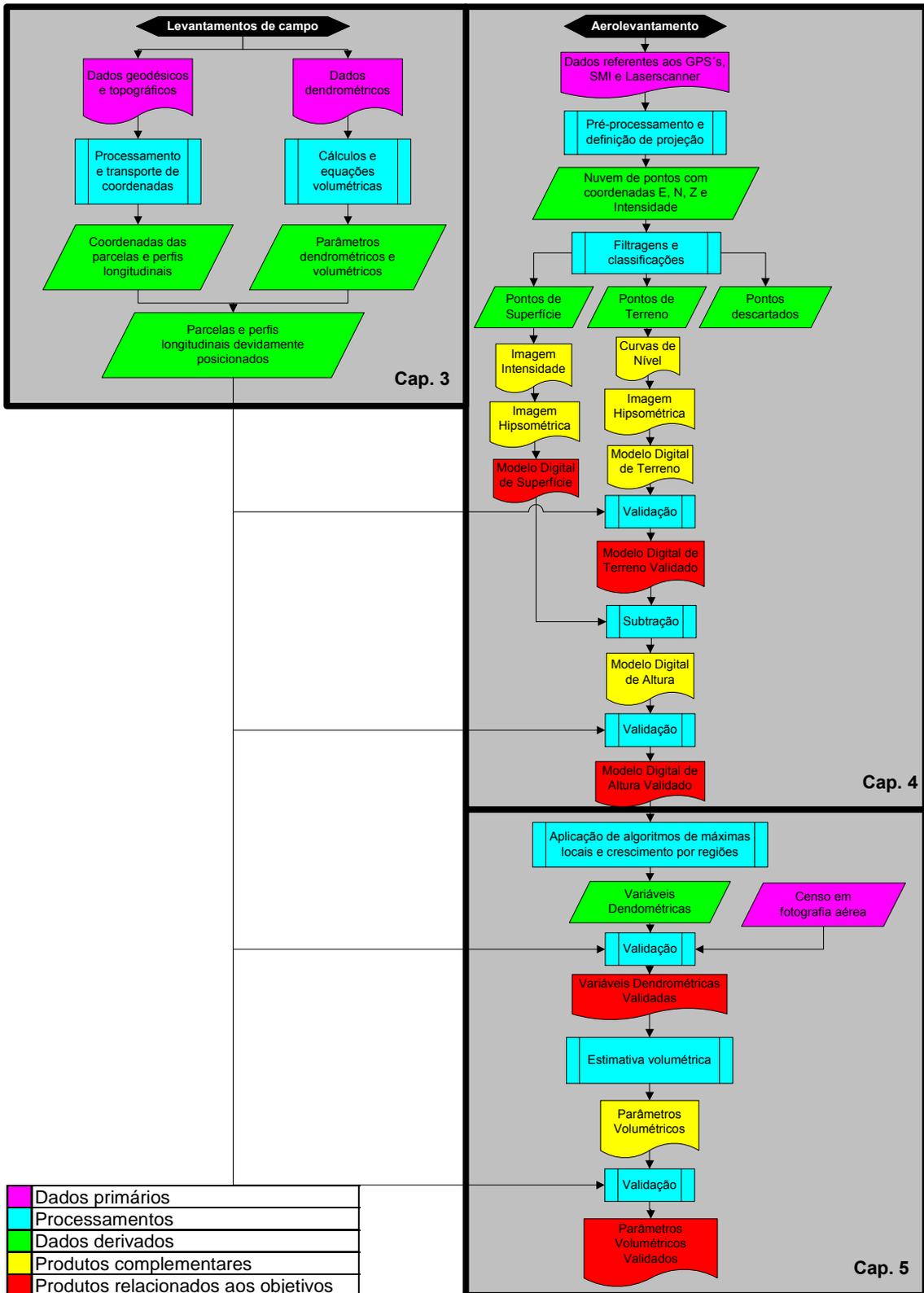
YOUNG, M.; MACADAM, D. L. **Optics and LASERs**. an engineering physics approach. springer series in optical sciences. Berlin, German: Springer-Verlag, 1977, 207p. p.144-170.

ZANDONÁ, D. F. **Potencial uso de dados Laserscanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR. 2006. 92p.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Utilização da tecnologia LIDAR para obtenção de altura individual e delimitação automática de copas em povoamento de Pinus sp. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3693-3700. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.45>>. Acesso em: 14 dez. 2008

ZIMBLE, D. A.; EVANS, D.L.; CARLSON, G. C.; PARKER, R.C.; GRADO, S. C.; GERARD, P. D. Characterising vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 87. p.171. 2003

APÊNDICE A - ESQUEMA METODOLÓGICO COMPLETO



ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DO ALTM 2050

Airborne Module	Operating altitude	180 - 3,000 m nominal	
	Elevation accuracy	15 cm at 1,200 m; 35 cm at 3,000 m (1 sigma)	
	Range resolution	1 cm	
	Scan angle	Variable from 0 to $\pm 20^\circ$	
	Swath width	Variable from 0 to 0.68 x altitude	
	Scan frequency	0 - 100 Hz, depending on scan angle (e.g., 28 Hz for $\pm 20^\circ$)	
	Horizontal accuracy	Better than 1/2,000 x altitude	
	Position / Orientation System	Applanix - Optech Custom	
	GPS receiver	Novatel Millennium (optional Trimble 750)	
	LASER repetition rate	50 kHz	
	Data storage	8 mm digital tape	
	Beam divergence	Dual 0.2 mrad (1/e) or 1.0mrad (1/e)	
	LASER classification	Class IV (FDA CFR 21)	
	Eyesafe range (unaided)	180 m @ 1.0 mrad, 650 m @ 0.2 mrad nominal	
	Power requirements	28 VDC, 24 A average, 35 A peak	
	Operating temperature	10 - 35° C	
Humidity	0 - 95% non-condensing		
Sensor	Fits standard camera mounts or mounts directly to floor		
	Dimensions:		
	Overall	29.6 x 32 x 55.5 cm	
	Minimum Opening	16.5 x 22.8 (flight direction) cm	
	Weight	20 kg (44 lbs)	
Control Racks	Two, each in a stackable, vibration-isolated case		
	POS/LASER:		
	Dimensions:	60 x 44 x 40 cm	
	Weight	36 kg with shipping covers	
	Computer:		
	Dimensions	60 x 44 x 49cm	
	Weight	45 kg with shipping covers and cables	
	Video output	NTSC or PAL (annotated video out)	
	Data storage	8 mm digital data tape	
	Processing Software	REALM Survey Suite	Differential Kinematic GPS solution Trajectory optimization from multiple base-stations XYZ point calculations module Vegetation feature extraction/classification Windows NT/2000 compatible
GPS Ground Support		Multiple Base Stations	Sercel NR103T, Trimble 4000/7400, Ashtech Z12 or other Rinex 2.0 compliant device
Available Option		Digital Camera	Integrated metric digital frame camera