

DANIELE FELIX ZANDONÁ

**POTENCIAL USO DE DADOS LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO PARA  
ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre, Curso de Pós-  
Graduação em Engenharia Florestal, Departamento  
de Ciências Agrárias, Universidade Federal do  
Paraná.**

**Orientador: Prof. Dra. Christel Lingnau  
Co-orientador: Prof. Dr. Nelson Y. Nakajima**

**CURITIBA**

**2006**

Ao Cicero, co-autor em todos os projetos...

e à nossa pequena Leticia

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão em primeiro lugar a Deus, pelo cuidado com a minha vida e a presença constante.

Aos meus pais, pelo exemplo e amor incondicional.

Ao Lactec, pelo financiamento e apoio ao projeto, em especial ao Mauricio Müller pela total confiança e incentivo.

À Christel Lingnau, pela orientação, apoio e paciência.

Ao Prof. Nelson Nakajima pelas sugestões e críticas construtivas.

Ao Prof. Carlos Roberto Sanquetta pela disponibilização dos resultados do Inventário Florestal em povoamento de *Pinus sp.* da Estação Experimental do Canguiri.

Aos amigos da Divisão de Geossoluções do Lactec, pelo espírito de equipe e amizade.

Aos estagiários que realizaram o trabalho de campo: Ana Paula, Joaquim, Lisâneas, Máisa, Marco, Kanke e Silvia, pelo esforço e dedicação.

A todos que contribuíram para que este projeto pudesse ser realizado.

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>7</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>4</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
4.1 TECNOLOGIA LIDAR .....	7
4.2 APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA LIDAR NO SETOR FLORESTAL.....	11
4.3 TECNOLOGIA LIDAR x FOTOGRAMETRIA.....	16
4.4 MODELOS DIGITAIS DE TERRENO E DE ELEVAÇÃO.....	18
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
5.1 ÁREA DE ESTUDO.....	21
5.2 BASE DE DADOS.....	22
5.2.1 Inventário Florestal.....	22
5.2.2 Dados LIDAR.....	25
5.2.3 Dados de campo.....	26
5.2.4 Ortofotos da região de estudo.....	29
<b>6 METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
6.1 PLANEJAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS LIDAR.....	30
6.2 PRÉ - PROCESSAMENTO DOS DADOS BRUTOS.....	33
6.2.1 Calibração do sistema.....	34
6.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS LIDAR.....	35
6.3.1 Geração de modelos digitais .....	36
6.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE CAMPO.....	37
6.5 AQUISIÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS.....	39
6.5.1 Reconhecimento e individualização das árvores.....	39
6.5.2 Delimitação das copas das árvores.....	41
6.6 ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL.....	44
6.6.1 Análise estatística dos modelos de volume.....	44
6.6.2 Estimativa do volume individual com casca.....	46
<b>7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>48</b>
7.1 CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS LIDAR.....	48
7.2 ESTRATIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO.....	50

7.2.1 Chave de Fotointerpretação.....	50
7.3.2 Estratificação da vegetação .....	51
<b>7.3 RECONHECIMENTO E INDIVIDUALIZAÇÃO DAS ÁRVORES.....</b>	<b>53</b>
7.4 OBTENÇÃO DA VARIÁVEL ALTURA.....	55
7.5 DELIMITAÇÃO DAS COPAS DAS ÁRVORES.....	56
7.6 MODELAGEM DO VOLUME INDIVIDUAL.....	57
7.6.1 Estimativa do diâmetro à altura do peito (DAP).....	57
7.6.2 Estimativa do volume através dos dados LIDAR.....	63
<b>8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
<b>9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO I - PLANILHA COM OS DADOS DE CAMPO.....</b>	<b>76</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 - Sistema a Laser Profile.....	7
Figura 02 - Componentes do sistema.....	9
Figura 03 - Retornos parciais do feixe Laser.....	10
Figura 04 - Imagem de intensidade ( Estação Experimental do Canguiri, UFPR - PR).....	11
Figura 05 - Imagem de hipsometria (Estação Experimental do Canguiri, UFPR - PR).....	11
Figura 06 - Modelos digitais.....	18
Figura 07 - Classificação dos pontos LIDAR em plantios de Eucalyptus sp.....	19
Figura 08 - Classificação dos pontos LIDAR em florestas naturais.....	19
Figura 09 - Mapa de localização da área de estudo.....	21
Figura 10 - Área de plantio inventariada (talhão B).....	22
Figura 11 - Equipamento OPTECH ALTM 2050.....	25
Figura 12 - Padrão de coleta dos dados LIDAR.....	31
Figura 13 - Densidade de retornos LIDAR para o primeiro e último retorno do pulso.....	32
Figura 14 - Fluxograma de aquisição dos dados LIDAR.....	33
Figura 15 - Parâmetros de ajuste para classificação no TerraScan.....	35
Figura 16 - Fluxograma de processamento dos dados LIDAR.....	36
Figura 17 - Localização das parcelas em campo.....	37
Figura 18 - Representação esquemática do algoritmo de individualização de árvores.....	40
Figura 19 - Delimitação das copas.....	42
Figura 20 - Nuvem de pontos classificada.....	48
Figura 21 - Modelos digitais De elevação E De terreno (MDE e MDT).....	48
Figura 22 - Modelo digital De alturas - MDA.....	49
Figura 23 - Chave de fotointerpretação - ortofoto e dados LIDAR (parcelas A a D).....	50
Figura 24: Chave de fotointerpretação - ortofoto e dados LIDAR (parcelas E a L).....	51
Figura 25 - Estratificação da área de estudo.....	52
Figura 26 - Resultado do algoritmo de identificação das árvores.....	54
Figura 27 - Resultado do algoritmo de delimitação das copas.....	56
Figura 28 - Análise de resíduos de regressão - DAP'.....	60
Figura 29 - DAP estimado x DAP medido.....	61
Figura 30 - Análise de resíduos de regressão – Volume LIDAR.....	66
Figura 31 - Volume Inventário x Volume LIDAR – Parcelas a a E.....	67
Figura 32 - Volume Inventário x Volume LIDAR – Parcelas F a L.....	68

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 01 - Comparação entre LIDAR e Fotogrametria.....	17
Tabela 02 - Valores médios das variáveis estimadas pelo Inventário Florestal.....	23
Tabela 03 - Distribuição diamétrica para o talhão B.....	23
Tabela 04 - Resumo dos resultados obtidos no Inventário Florestal – talhão B.....	23
Tabela 05 - Parâmetros do voo LIDAR.....	25
Tabela 06 - Especificações do sistema ALTM 2050.....	26
Tabela 07 - Definição de classes de densidade.....	27
Tabela 08 - Definição de classes de DAP .....	27
Tabela 09 - Resumo das árvores mensuradas por parcela.....	28
Tabela 10 - Características das ortofotos.....	29
Tabela 11 - Valores médios obtidos para as variáveis medidas em campo.....	41
Tabela 12 - Coeficientes ajustados para o polinômio do 5º grau.....	47
Tabela 13 - Identificação das árvores.....	49
Tabela 14 - Diferença entre as alturas medidas em campo e através dos dados LIDAR.....	51
Tabela 15 - Modelos ajustados para estimativa de DAP – Análise estatística.....	57
Tabela 16 - Coeficientes ajustados para os modelos de volume estimado pelos dados LIDAR.....	62

## RESUMO

A administração dos recursos naturais, tanto no que se refere ao seu uso econômico, quanto à conservação, requer alta confiabilidade e acurácia das informações espaciais como altura das árvores, densidade e volume do talhão, entre outras. Como a obtenção destas variáveis em campo consome tempo e recursos, e em alguns casos torna-se inviável pelas dificuldades de acesso, a fotointerpretação e a fotogrametria têm sido extensivamente utilizadas. No entanto, o alto custo de aquisição e interpretação de fotografias aéreas motivou o estudo de outras alternativas e métodos de sensoriamento remoto. Após décadas de esforços envolvendo o desenvolvimento de novos sensores e metodologias para o processamento de imagens multi-espectrais, não houve sucesso considerável em prover medições confiáveis a respeito das características tridimensionais da floresta para um nível de escala compatível ao talhão. Em particular, informações como altura individual das árvores, são difíceis de serem determinadas a partir de imagens monoscópicas. A aquisição de dados de Laser Scanner Aerotransportado (LSA), sistemas baseados na tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), constituem ferramenta promissora para determinação de estruturas horizontais e verticais da floresta, estimativas de biomassa florestal e quantificação de carbono. Este trabalho propõe uma metodologia para mapeamento da vegetação e cálculo de volume florestal a partir de dados adquiridos com um sistema LSA, modelo *Optech ALTM 2050 (Airborne Laser Terrain Mapper)*, para uma área piloto localizada na Estação Experimental do Canguiri no município de Pinhais - PR. A área total corresponde a 28,9 ha, subdivida em três talhões com plantios de *Pinus* sp.. Para a estimativa do volume florestal são utilizadas, como variáveis independentes nos modelos de regressão, as informações obtidas por meio do processamento e interpretação dos dados LIDAR, como: a altura individual, área e diâmetro de copa. A extração destas variáveis foi realizada através de algoritmos para individualização das árvores e delimitação automática das copas, implementados em ambiente de geoprocessamento, no software ArcGIS 9.0 (ESRI). Através das características dendrométricas extraídas, como altura total e área de copa, foram estabelecidas correlações e ajustados modelos de regressão para estimativas de volume.

Palavras-chave: LIDAR, individualização de árvores, estimativa de variáveis dendrométricas

## ABSTRACT

The natural resources administration, both for economical and conservation purposes, requires that information, such as tree height and stand volume and density, must be highly trusted and accurate. Since the ground inventory demands time and resources, and in some cases is unmanageable, photointerpretation and photogrammetry have been extensively used. Even though, the high costs of aerial photos acquisition and interpretation motivated the study of alternatives. After decades of efforts towards the development of new sensors and methodologies for the multispectral images, it has not been considerable success in providing reliable measures regarding the forests tridimensional characteristics, for a compatible stand scale. Information like individual tree height are difficult to determine from monoscopic images. The data acquisition through Airborne Laser Scanning - ALS systems, based in LIDAR technology (*Light Detection and Ranging*), are promising tools for obtaining vertical and horizontal forest structures, forest biomass estimative and carbon quantification. This work presents a methodology for vegetation mapping and forest volume estimation from data acquired by a ALS system, *Optech ALTM 2050 (Airborne Laser Terrain Mapper)*, from a study site in Pinhais-PR. The total area is about 28.9ha, divided in three stands with planted forest (*Pinus* sp). For the volume estimation the data obtained from LIDAR processing and interpretation, such as individual height, area and crown diameter are used as independent variables in regression models. The variables were determined through tree individualization and automatic crown detection, implemented in GIS (*Geographic Information System*), using ESRI ArcGIS 9.0 software. From the dendrometric characteristics extracted, such as tree height and crown area, it was possible to determine correlations and regression adjusted models for volume estimation.

Keywords: LIDAR, tree detection, dendrometric variables estimating



## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de novas técnicas para obtenção de dados a respeito da cobertura vegetal têm sido extensivamente discutida, seja para avaliação do potencial econômico de um maciço florestal, seja para fins de preservação ambiental.

O acesso mais facilitado à informação cria um novo obstáculo para técnicos e engenheiros: adaptar o conhecimento aos novos métodos de aquisição de dados e manipular estas informações de modo a gerar resultados confiáveis.

Neste trabalho são discutidos os sistemas Laser Scanner Aerotransportados – LSA, baseados na tecnologia LIDAR, acrônimo de *Light Detection and Ranging*, que utiliza a energia LASER para medir distâncias<sup>1</sup>.

Esta tecnologia apresenta-se como uma ferramenta proeminente para aquisição de dados topográficos tridimensionais com alta precisão. Em áreas florestais, torna-se possível conhecer a estrutura da vegetação e derivar informações importantes a respeito da cobertura vegetal.

As técnicas tradicionais de inventário florestal demandam tempo e recursos e em alguns casos são inviáveis pelas dificuldades de acesso. Os trabalhos já desenvolvidos e publicados indicam que é possível a extração de variáveis dendrométricas como: altura individual e diâmetro de copa a partir dos dados LIDAR, e com isso obter um ganho na precisão das estimativas de volume e biomassa florestal.

Quando se avalia o povoamento florestal sob o ponto de vista de manejo, torna-se necessário conhecer quanto, quando, onde e como será manejado. Através dos dados LIDAR integrados com Sistemas de Informações Geográficas, torna-se possível, não somente calcular o volume individual da árvore, como também visualizar sua distribuição espacial em todo o povoamento. Estas informações poderão ser utilizadas em modelos de otimização de prognose da produção, além de fornecer parâmetros para avaliações sobre o crescimento da vegetação, mapeamento de sítios florestais e estudos de melhoramento de espécies.

Este trabalho apresenta uma metodologia para extração de variáveis dendrométricas

---

<sup>1</sup> Quando o texto se referir a dados LIDAR ou dados Laser corresponde a dados adquiridos via sensor LSA.

a partir de dados provenientes de Sensor Laser Aerotransportado, bem como técnicas de processamento dos dados e algoritmos específicos para aquisição automática destas destas variáveis, como: altura individual e área de copa.

Estes dados são utilizados como variáveis independentes em modelos volumétricos, tendo sua eficiência analisada estatisticamente.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de metodologia para processamento e interpretação de dados adquiridos via sensor Laser Scanner Aerotransportado para cálculo de variáveis dendrométricas, a serem empregadas na modelagem de volume para um povoamento florestal de *Pinus* sp.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estratificação da vegetação com base na altura derivada dos Modelos Digitais de Terreno e de Elevação obtidos por meio de dados LIDAR, para alocação das parcelas de campo;

Validação de algoritmo para individualização das árvores no povoamento e mapeamento de copas;

Utilização das variáveis derivadas dos dados LIDAR, como altura total e área de copa, para estimativa do volume do povoamento florestal tendo como valores de referência dados de inventário florestal e medições em campo.

### 3 JUSTIFICATIVA

Recentes desenvolvimentos em sensoriamento remoto tridimensional, incluindo estéreo-fotogrametria digital, interferometria por RADAR e LIDAR, em tese, apresentam uma amostragem mais apropriada com relação aos aspectos estruturais da vegetação. Porém, enquanto a estéreo-fotogrametria digital e a interferometria por Radar têm a capacidade de prover mapas da superfície das copas, ambas possuem baixa acurácia quanto à altura das copas, especialmente em florestas densas (BENOÎT et al., 2001).

Os sistemas baseados na tecnologia LIDAR são capazes de fornecer modelos acurados a respeito das copas das árvores e da altura da vegetação. Essa característica se dá em função da pequena divergência dos pulsos laser que, de fato, permite que a energia coerente penetre em áreas com vegetação densa. Essa tecnologia pode ser considerada superior aos métodos fotogramétricos para aplicações florestais, sobretudo em função do conhecimento da superfície do terreno, que, para estas áreas, é dificilmente visualizada em fotografias aéreas (POPESCU, 2002).

A definição de metodologias e *softwares* de processamento dos dados LIIDAR, ainda constitui um vasto campo para a pesquisa científica. A medida que as indústrias investem em atualizações e novas funcionalidades para os sensores, aumentando o volume de informação gerada, novas aplicações surgem e devem ser consideradas.

São exemplos de aplicações onde a tecnologia LIDAR supera as tecnologias convencionais, como a fotogrametria (BALTASAVIAS, 1999a):

- a) Mapeamento de florestas e áreas cobertas por vegetação: geração de modelos digitais de terreno, estratificação da vegetação, extração de parâmetros biofísicos, estimativas de volume e biomassa, quantificação de carbono;
- b) Mapeamento de corredores: rodovias (planejamento e projeto); linhas de transmissão (planejamento, projeto e estudos de recapacitação); monitoramento de erosão em zonas costeiras; estudos de tráfego e transportes; mapeamento de rios e estudos hídricos; mapeamento de dutos, diques, etc;
- c) Geração de modelos digitais para regiões urbanas: determinação das alturas das

edificações; planejamento de antenas para telecomunicações;

d) Mapeamento de áreas inundáveis: geração de modelos digitais de terreno como parâmetros de entrada em modelos de propagação de cheias e estudos de enchente, identificação de infra-estruturas e áreas de risco, planos de contingência;

e) Mapeamento de superfícies com baixa diferenciação de texturas (gelo, areia, neve).

Em função de características já mencionadas, como a obtenção de informações tridimensionais acerca da estrutura da vegetação, a tecnologia LIDAR apresenta-se como uma ferramenta promissora para o setor florestal. Os métodos tradicionais de inventário demandam elevada quantidade de tempo e recursos e em alguns casos são inviáveis pelas dificuldades de acesso.

Os estudos em florestas plantadas encontram-se em um patamar superior às florestas nativas, onde variáveis como idade e espécie interferem no crescimento e nas estimativas de volume e biomassa. Um dos benefícios da tecnologia LIDAR é justamente a obtenção da altura individual e informações sobre a estrutura das copas, possibilitando a inclusão de novas variáveis nos modelos de regressão. Além disso, torna-se possível uma estratificação florestal por meio da altura, que poderá ser utilizada como uma ferramenta auxiliar para definição e alocação das parcelas em campo, reduzindo o erro amostral das estimativas.

Na literatura, sobretudo referente às pesquisas no Brasil, não existem estudos específicos tratando a relação custo/benefício entre um levantamento LIDAR e métodos tradicionais de inventário florestal.

Este trabalho pode ser considerado um dos pioneiros para o setor florestal brasileiro e a metodologia para manipulação dos dados nesta área de conhecimento ainda está em desenvolvimento. Embora existam vários exemplos na literatura internacional abordando este tema, a aplicação para as condições florestais brasileiras ainda é um desafio. Porém, como já citado, trata-se de uma tecnologia madura e para alguns setores e mercados é uma opção bastante competitiva e operacional. No setor energético, (mapeamento de linhas de transmissão, por exemplo), as empresas têm priorizado o uso do LIDAR em função das vantagens técnicas e da rapidez de execução.

Avaliando os diferentes produtos possíveis de se obter a partir de um único levantamento, torna-se difícil uma comparação direta entre a tecnologia LIDAR e métodos de inventários tradicionais. Esta pesquisa se propõe a criar uma base de conhecimento e motivar outros estudos a respeito de como estas informações poderão ser manuseadas, e, qual o nível de confiabilidade das estimativas de volume e das variáveis dendrométricas.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

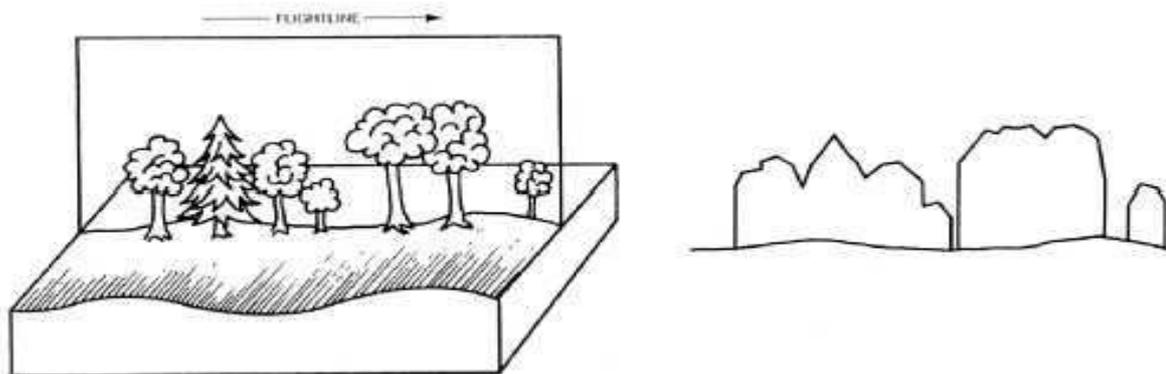
### 4.1 TECNOLOGIA LIDAR

Os sistemas a laser aerotransportados, baseados na tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), permitem a obtenção de informações tridimensionais acerca da superfície terrestre com alta precisão (POPESCU, 2002). A tecnologia LIDAR utiliza a energia LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) para medir distância de objetos a um determinado alvo.

Embora o primeiro sensor tenha chegado ao Brasil em 2000 e atualmente existam somente três equipamentos em operação no país, a tecnologia, por sua vez, teve seu início nos anos 80, sendo uma solução para mapeamento utilizada mundialmente em larga escala.

Os primeiros sensores operavam no modo *profile* ou de perfil, caracterizando-se por emitir um feixe perpendicular a linha de vôo, sendo possível obter um perfil do terreno e das estruturas verticais existentes (Figura 01). As primeiras aplicações que surgiram a partir desses sensores foram para a área florestal, para quantificar as características verticais da vegetação.

FIGURA 01 - SISTEMA A LASER *PROFILE*



FONTE: NELSON et al. 1984, citado por POPESCU, 2002

SCHREIRER et al. (1985) utilizou a altura extraída do perfil, a reflexão do laser e outros parâmetros para desenvolver uma técnica de classificação semi-automática, permitindo uma diferenciação entre florestas de coníferas e folhosas.

No início dos anos 90 os sensores tipo *profile* foram sendo gradualmente substituídos pelos *scanners*. Esses sistemas operam com ângulo de abertura e frequência de repetição do pulso variáveis. Para uma determinada altura de vôo -  $h$ , o diâmetro do feixe no solo -  $DF$  é função da divergência do feixe laser -  $\gamma$  (rad) e o ângulo do *scanner* instantâneo  $\theta_{inst}$  (graus). O valor de  $DF$  pode ser obtido pela equação (1) (WEHR e LOHR, 1999, BALTASAVIAS, 1999b, citado por POPESCU, 2002):

$$DF = h\gamma / \cos^2(\theta_{inst}) \quad (1)$$

A largura da faixa -  $LF$  depende do ângulo de *scanner*  $\theta$  (graus), que também define o *Field of View* -  $FOV$ , conforme equação (2):

$$LF = 2h \tan(\theta/2) \quad (2)$$

A densidade de pontos resultante depende do equipamento utilizado (ângulo de abertura do *scanner*, diâmetro do feixe e frequência de varredura) e de características do aerolevanteamento (velocidade da aeronave e altura de vôo).

Existem basicamente dois grandes grupos de sensores do tipo *scanner*, (LEFSKY et al., 2002). O primeiro se caracteriza por emitir um feixe de grande diâmetro (dezenas de metros), onde a energia retornada é armazenada como um perfil de intensidade de alturas. Esses sensores incluem o SLICER (*Scanning LIDAR Imagery of Canopies by Echo Recovery*), LVIS (*Laser Vegetation Imaging Sensor*), VCL (*Vegetation Canopy LIDAR*) e ICESat (LEFSKY et al., 2002), desenvolvidos pela NASA e utilizados para validação de futuras missões utilizando plataformas orbitais.

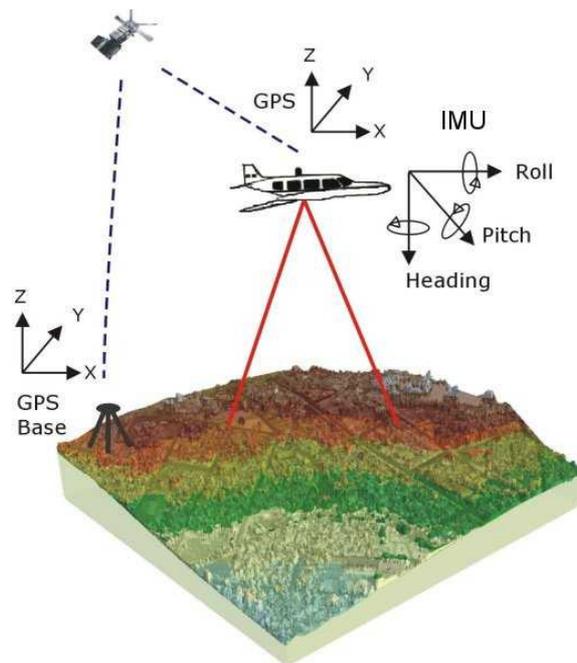
O segundo grupo, os sensores de retorno discreto, caracterizam-se por emitir um feixe de diâmetro de ordem centimétrica e armazenar a posição de cada pulso laser retornado. Diferentes sistemas podem registrar de 1 a 5 retornos de cada pulso. Esses sistemas são os disponíveis comercialmente (BALTASAVIAS, 1999b), e são utilizados extensivamente para o desenvolvimento de modelos digitais (FLOOD e GUTELIUS, 1997).

Neste trabalho serão discutidas as aplicações dos sistemas de retorno discreto, uma vez que a base de dados para o projeto foi adquirida utilizando este tipo de sensor.

Os sistemas LIDAR são considerados sensores ativos, sendo os similares ópticos ao RADAR (*Radio Detection and Ranging*).

O princípio de funcionamento consiste na emissão de feixe laser em direção à superfície terrestre, onde estes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e captados pelo sensor. Para cada feixe emitido é registrado o tempo de percurso aeronave – obstáculo – aeronave, permitindo ao sistema realizar o cálculo da distância. Utilizando unidades de medições auxiliares, como o GPS (*Global Position System*) e o IMU (*Inertial Measurement Unit*), que registram a posição e a atitude (rotações) da aeronave durante o voo, torna-se possível definir a posição tridimensional de pontos na superfície numa fase de pós-processamento. A Figura 02 ilustra os componentes do sistema.

FIGURA 02 - COMPONENTES DO SISTEMA



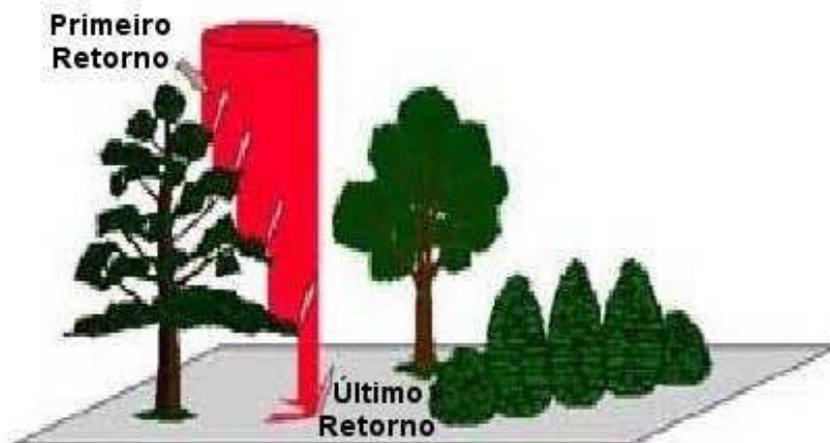
FONTE: LACTEC, 2002

O sistema só consegue emitir um feixe laser por vez. Essa restrição é compensada

pela emissão de milhares de feixes por segundo, direcionados para o solo por meio de um espelho. A direção do espelho varia numa taxa especificada pelo operador do sistema. A varredura do terreno é realizada em linhas quase perpendiculares à direção de vôo. Como a aeronave está em movimento, os pontos são coletados em linhas diferentes, produzindo faixas de largura variável, em função do tipo de equipamento.

Quando o feixe é emitido pode ocorrer que porção deste encontre um ou mais objetos antes de atingir o solo, gerando retornos parciais. O sistema utilizado neste trabalho armazena dados do primeiro e do último retorno do pulso (Figura 03). Através dessas informações é possível gerar modelos digitais a partir do primeiro pulso, do último e de ambos.

FIGURA 03 - RETORNOS PARCIAIS DO FEIXE LASER

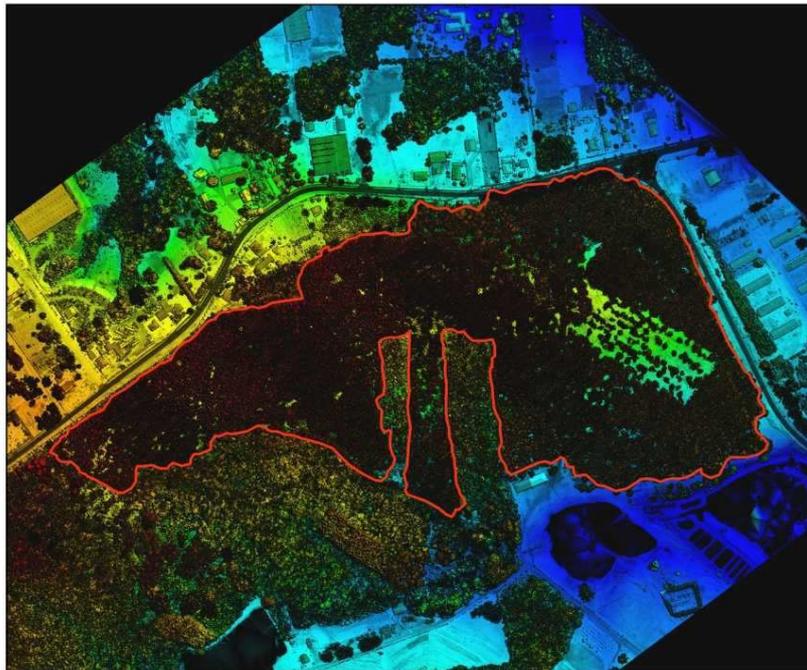


Além das informações descritas, o sistema armazena, para cada ponto mapeado, o valor de reflectância dos materiais alvo. Esses atributos podem ser utilizados para a geração de imagens e mapas temáticos, contribuindo para a identificação e restituição de feições no terreno. É possível, através dessas informações, gerar orto-imagens de intensidade e de hipsometria (intensidade combinada com informação altimétrica), conforme Figuras 04 e 05.

FIGURA 04 - IMAGEM DE INTENSIDADE ( ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO CANGUIRI, UFPR - PR)



FIGURA 05 - IMAGEM DE HIPSOMETRIA (ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DO CANGUIRI, UFPR - PR)



## 4.2 APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA LIDAR NO SETOR FLORESTAL

Uma das necessidades básicas na mensuração florestal é a determinação do volume individual das árvores. Como é inviável a cubagem rigorosa de todas as árvores de um maciço florestal, torna-se necessário o uso de métodos estimativos. Dentre as variáveis mensuráveis em uma árvore e no povoamento florestal, o diâmetro se constitui na primeira variável independente a ser utilizada nos modelos de regressão. Isso ocorre em função da fácil obtenção desta variável em campo e por apresentar alta correlação com o volume, peso e com outras variáveis dependentes.

A variável altura corresponde a outra importante característica da árvore, que pode ser estimada. Sua principal utilização é justamente no cálculo de volume e de incremento em altura e volume. Nos métodos estimativos, a altura costuma ser utilizada como uma segunda variável independente nas tabelas de volume, funções de afilamento e em algumas outras relações dendrométricas.

Quando se está analisando o povoamento florestal, a altura média é uma informação de grande relevância da floresta em desenvolvimento. A altura média das dominantes ( $h_{dom}$ ), que pode ser considerada como a média das alturas das 100 árvores de maior diâmetro por hectare, é muito usada como indicadora da capacidade produtiva de terrenos florestais. Quando relacionada à idade em povoamentos puros equiâneos, expressa o índice de sítio, sendo este um valor numérico da altura dominante, que também é usado como variável independente na construção de tabelas de produção, ou simplesmente em funções de crescimento e produção (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2003).

Através dos dados LIDAR não é possível a obtenção direta da variável diâmetro, entretanto, variáveis como altura e diâmetro de copa podem ser derivadas. Os trabalhos já desenvolvidos e publicados concentram-se na utilização destas variáveis, possíveis de serem obtidas a partir dos dados LIDAR para estimativas de volume e biomassa florestal.

NELSON, KRABILL e TONELLI (1988) conduziram uma pesquisa para uma empresa de papel no sudoeste da Georgia - EUA, para estimativa de biomassa em florestas de *Pinus*. O modelo de regressão utilizado teve como variável independente a altura derivada dos dados LIDAR, explicando 55% da variância. Houve um ganho de 0,4% na acurácia

quando se fez uma estratificação por espécie, porém este ganho foi muito pequeno se comparado ao esforço de instalar novas parcelas em campo por estrato. Os resultados obtidos indicaram que é possível estimar biomassa com acurácia, mas existe muita variação de um local para outro, logo, os coeficientes de regressão ajustados para uma área de estudo não podem ser utilizados em outra área, mesmo que esta apresente povoamento em condições semelhantes.

DRAKE et al. (2002) definiram um modelo de regressão para estimar biomassa em florestas tropicais úmidas capaz de explicar 93% da variância, utilizando a mediana da altura, extraída dos dados LIDAR. MEANS et al. (1999) utilizaram como preditor o quadrado da altura média, explicando 94% da variância, utilizando sensor de retorno contínuo SLICER (*Scanning LIDAR Imager of Canopies by Echo Recovery*). LEFSKY (1999a), também utilizando sensor de retorno contínuo, foi capaz de explicar 70% da variância para a área basal e 80% para a biomassa, tendo como melhor preditor a altura média quadrática.

Para finalidades de inventário florestal, pode ser citado o trabalho conduzido pela SPENCER B. GROSS INC. (1999), com a finalidade de avaliar a possibilidade de se construir modelos de regressão para estimar características individuais das árvores. Nesse estudo, foram instaladas parcelas em campo, onde foram tomadas as alturas utilizando instrumentos como: *Impulse Laser Rangefinder*, *Barr* e dendrômetro óptico. Também mensurou-se o DAP e o diâmetro de copa, sendo este tomado em quatro direções. Para o cálculo do volume real foram utilizadas tabelas de volume já definidas para a área, neste caso se tratando de florestas de *Douglas fir*. Para comparação dos resultados, os dados medidos em campo foram relacionados aos dados LIDAR. Os valores de altura foram determinados considerando como o ponto mais alto acima do solo em cada copa. Estas, foram delineadas manualmente, utilizando como base um mapa de isolinhas equidistantes de 0,5m. Os resultados reportam uma acurácia na estimativa do volume de 91%. As variáveis independentes utilizadas no modelo foram a altura e o diâmetro de copa.

FRIEDLAENDER e KOCH (2000) realizaram trabalho semelhante ao descrito no parágrafo anterior em florestas coníferas, mistas e folhosas, abrangendo áreas de cobertura vegetal densa e esparsa. Foi proposto um algoritmo para delimitação semi-automática das

copas, baseado em isolinhas. Em geral houve uma tendência dos dados LIDAR a subestimar a altura das árvores, porém houve sucesso na detecção das copas.

Em relação a detecção automática das copas, o algoritmo mais conhecido para esta finalidade foi desenvolvido pelo Serviço Florestal Canadense (GOUGEON, 1998). Outros estudos foram realizados (POLLOCK, 1998; LARSEN, 1998). Em 2001, pode-se citar o trabalho de ANDERSEN et al. (2001) com o desenvolvimento de um algoritmo para individualização de árvores através de análise morfológica. Os resultados mostraram-se eficientes quando comparados com fotografias aéreas na escala 1:3.000, neste caso, os resultados não foram confrontados com dados de campo. POULIOT et al. (2002) apresentaram metodologia para delimitação automática de copas em florestas de coníferas em regeneração, utilizando além de dados LIDAR, câmera digital de alta resolução.

Outras abordagens foram avaliadas para a individualização das árvores, como a segmentação multi resolução hierárquica. AARDT e WYNNE (2004) exploraram esta técnica em florestas de coníferas e folhosas, atingindo uma acurácia de 66% para as coníferas e 56% para as folhosas na modelagem do volume. Para a discriminação entre essas duas classes (coníferas e folhosas), realizou-se uma classificação orientada a objeto que apresentou acurácia de 89%.

Tratando da modelagem do volume, pode-se acrescentar o trabalho desenvolvido por MALTAMO et al. (2006), com avaliações entre modelos de volume com diferentes variáveis independentes derivadas dos dados LIDAR. Este trabalho também apresenta uma simulação de redução da densidade de pontos LIDAR, fato este que, segundo os autores, não acarretou perda de precisão nas estimativas volumétricas. Se o número de pulsos laser variar de 3 a 5 pontos/m<sup>2</sup> (ou acima) torna-se possível o reconhecimento de árvores individuais (BRANDTBERG, 1998; HYPPA e INKENEN, 1999; PERSSON et al, 2002; POPESCU et. al, 2004; LECKIE et. al, 2003).

As duas categorias de sistemas LIDAR têm sido utilizadas com sucesso, para estimativas de variáveis florestais, como altura média, biomassa, área basal, volume do povoamento e densidade em diferentes tipos florestais (MEANS et al., 1999, 2000; LEFSKY et al., 1999a,b, 2002a; DUBAYAH e DRAKE, 2000; DRAKE et al., 2002, 2003; NAESSET e BJERKNES, 2001; NAESSET e OKLAND, 2002; NAESSET, 2002). Outras aplicações

como quantificação de carbono (PATENAUDE et al, 2004; BROWN, 2001) e índice de área foliar (RIÃÑO et al, 2004) podem ser citadas.

O procedimento mais utilizado para estimativa de biomassa florestal, é com o uso de modelos de regressão. Algumas das variáveis mais utilizadas em modelos lineares e não lineares são: *DAP* (diâmetro à altura do peito), *h* (altura total), idade e diâmetro ou altura de copa. Modelando o *DAP* em função de *h* pode-se minimizar a impossibilidade de se extrair a informação de diâmetro dos dados LIDAR (POPESCU, 2004).

Estudos compararam alturas derivadas pelos dados LIDAR e medições em campo (NAESSET, 1997a, 1997b; MAGNUSSEN e BOUDEWYN, 1998; MAGNUSSEN, EGGERMONT e LARICCIA, 1999). Algumas pesquisas mostram que em florestas com cobertura de moderada a densa, os sistemas LIDAR tendem a subestimar a altura (NILSSON, 1996; NAESSET, 1997a). Foi observado que a diminuição de frequência de retornos provenientes diretamente do terreno pode degradar os valores derivados para altura (POPESCU, 2002).

YOUNG et al. (2000) estimaram a altura de um povoamento de *Pinus taeda*. Técnicas de filtragem local e análises em bloco foram utilizados para encontrar o centro geométrico de cada bloco nos dados LIDAR, e estes foram assumidos como sendo o topo das árvores. As alturas foram obtidas através da subtração dos modelos interpolados do primeiro e último retorno do pulso. Variações deste método estão presentes em alguns dos trabalhos já mencionados. Os resultados indicam que os dados LIDAR podem produzir boas estimativas de parâmetros biofísicos de um povoamento florestal, e estes podem ser utilizados para prever volume ou biomassa.

### 4.3 TECNOLOGIA LIDAR X FOTOGRAMETRIA

Uma das principais vantagens que o mapeamento a Laser oferece sobre a fotogrametria tradicional é a habilidade de medir de forma direta, pontos sobre a superfície do terreno em áreas florestais. Sabe-se que alguns pulsos Laser encontram aberturas entre as copas das árvores e atingem o solo ou a vegetação rasteira. Estes pulsos permitem que sejam gerados, através de métodos apropriados de interpolação, modelos digitais de terreno de alta resolução.

A tecnologia LIDAR possui alguns pontos fortes em relação à fotogrametria, como o aumento da densidade de pontos em áreas de vegetação densa, não dependência de condições específicas de luminosidade (sensor ativo), resposta rápida em caso de desastres naturais e aquisição direta de coordenadas tridimensionais (BALTASAVIAS, 1999a).

Os dados LIDAR podem também ser utilizados para ortorretificação de imagens provenientes de câmeras digitais, fotografias aéreas e imagens de satélite de alta resolução.

Embora as duas tecnologias sejam competitivas para muitas aplicações, não são mutuamente exclusivas. A integração das tecnologias pode gerar resultados mais acurados para classificação e restituição de feições no terreno. A Tabela 01 apresenta uma comparação entre a tecnologia LIDAR e fotogrametria.

TABELA 01 - COMPARAÇÃO ENTRE LIDAR E FOTOGRAMETRIA

LIDAR		FOTOGRAMETRIA
Fonte de energia	Ativo	Passivo
Geometria	Polar	Perspectiva
Tipo sensor	Pontual	Quadro ou varredura
Medição dos pontos	Direta	Indireta
Amostragem	Pontos individuais	Toda a área
Imagem associada	8 bits monocromática	RGB alta qualidade
Precisão horizontal	2 a 3,5 vezes menor que a precisão vertical	1/3 melhor que a vertical
Precisão vertical	1000m de altura – 10 a 15 cm 2000m de altura – 25 cm	Função da altitude de vôo, da distância focal da câmera e qualidade do apoio.
Planejamento do vôo	Sobreposição lateral (30%) apenas para obtenção de cobertura contínua, pelo fato das faixas serem mais estreitas e estarem mais sujeitas a erros do piloto e do GPS de navegação	Sobreposição longitudinal (60%) para formação do par estereoscópico. Deve ser prevista sobreposição transversal para formação do bloco
Restrições de vôo	Menor impacto, independe da luz do sol	Somente de dia e com condição climática favorável (céu de brigadeiro)
Taxa de produtividade	Maior automação e rapidez	
Custo	25% a 33% do custo da fotogrametria	
Produção	Software proprietário – processamento realizado pela empresa de LIDAR	Software disponível para usuário final

#### 4.4 MODELOS DIGITAIS DE TERRENO E DE ELEVAÇÃO

O conceito de criação de Modelos Digitais de Terreno é relativamente recente. Uma das primeiras definições sobre este assunto surgiu na década de 50, considerando o Modelo Digital de Terreno como sendo simplesmente uma representação estatística contínua da superfície terrestre por um grande número de pontos selecionados onde são conhecidas as coordenadas x, y e z em um campo de coordenadas arbitrárias (MILLER et al, 1958).

De acordo com PETRIE e KENNIE (1990), Modelo Digital de Terreno é o mais complexo e abrangente conceito envolvendo não somente alturas e elevações, mas outros elementos geográficos e características naturais como rios, linhas de cume, etc. Além disso, diferentemente da definição anterior, esta representação pode também incluir dados derivados sobre o terreno modelado, como por exemplo, a declividade.

O Modelo Digital de Elevação, por sua vez, representa todas as estruturas presentes na superfície do terreno (vegetação, construções, linhas de transmissão, infra-estruturas, etc).

A partir dos dados LIDAR, torna-se possível a classificação dos pontos em Modelo Digital de Terreno - MDT, compreendendo os pontos considerados pertencentes ao solo e, em Modelo Digital de Elevação – MDE, abrangendo às demais entidades. A Figura 06 apresenta, respectivamente: MDE e MDT para um povoamento de *Eucalyptus sp.*

FIGURA 06 - MODELOS DIGITAIS



MDE

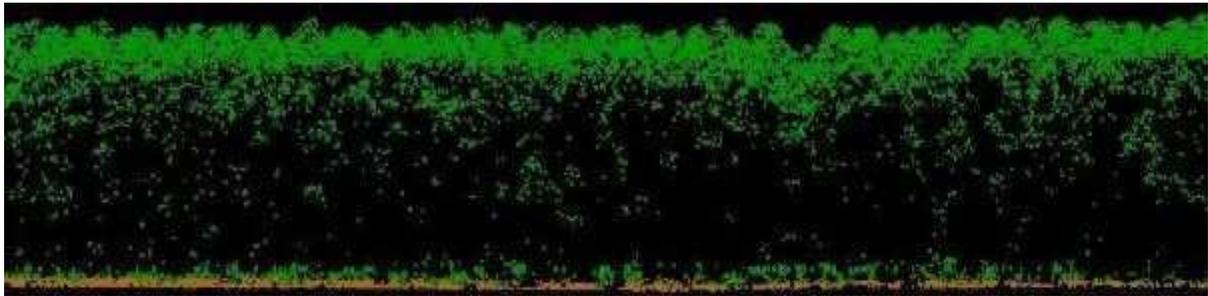


MDT

A precisão vertical em áreas abertas, dependendo do tipo de equipamento e altura de vôo, pode ser menor ou igual a 15cm. Porém em superfícies com cobertura vegetal densa, existe uma incerteza quanto a origem do ponto refletido (terreno ou vegetação). Em algumas situações a acurácia do MDT é fortemente influenciada pela habilidade de filtrar e classificar os dados em terreno e não-terreno, de modo que a superfície resultante possa ser descrita apenas pelas reflexões obtidas diretamente do solo (HAUGERUD e HARDING, 2001).

As Figuras 07 e 08 apresentam respectivamente um perfil com a nuvem de pontos já classificada em terreno e vegetação, para plantios de *Eucalyptus* e área remanescente de Floresta Ombrófila Densa na APA – Área de Proteção Ambiental de Guaraqueçaba - PR.

FIGURA 07 - CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS LIDAR EM PLANTIOS DE *EUCALYPTUS* SP.



Nota: Área localizada em Jacareí - SP

FONTE: LACTEC, 2003

FIGURA 08 - CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS LIDAR EM FLORESTAS NATURAIS



Nota: Área de Proteção Ambiental de Guaraqueçaba - PR

FONTE: LACTEC, 2003

REUTEBUCH et al. (2003) apresentaram uma avaliação da acurácia dos modelos digitais de terreno para floresta de coníferas em região montanhosa, apresentando áreas densamente povoadas com idades atingindo 70 anos e áreas com corte raso. Foram analisadas as seguintes classes de densidade: i) áreas abertas (corte raso); ii) 40 árvores/ha

(desbaste severo); iii) 175 árvores/ha (desbaste ameno); iv) 280 árvores/ha (sem desbaste). Os modelos gerados foram comparados com topografia convencional, onde foram coletados 347 pontos de controle distribuídos de modo a abranger a variabilidade das condições do povoamento. Como esperado, a magnitude do erro foi maior nas áreas de maior densidade, porém mesmo nestes casos a acurácia foi considerada alta com diferenças médias equivalentes a  $0,22 \pm 0,24$ m. Neste caso o número de retornos provenientes diretamente do terreno foi de 1 ponto/m<sup>2</sup>, tornando possível a modelagem precisa da micro-topografia do terreno em área florestal.

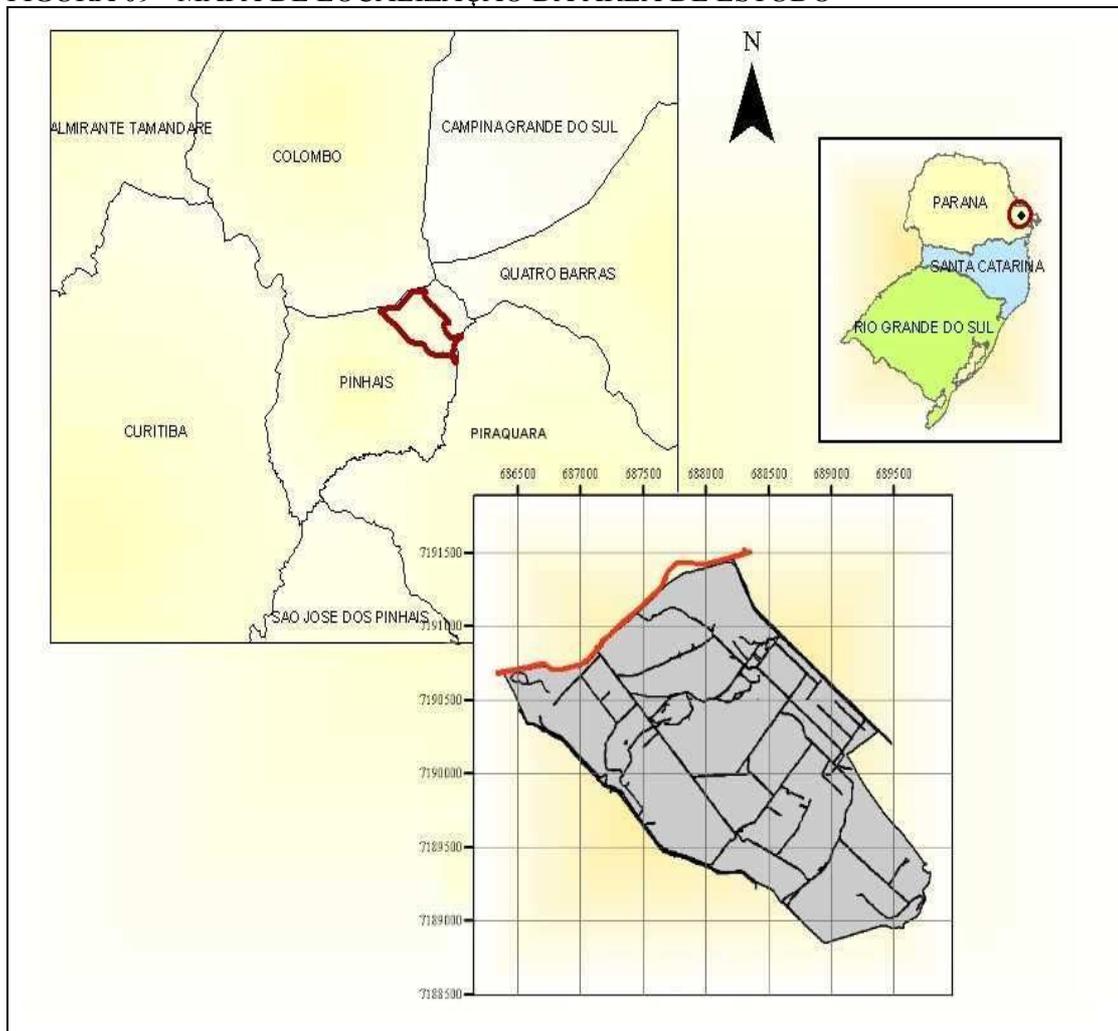
Existem poucos trabalhos publicados que detalham os métodos de filtragem em pontos de terreno e de vegetação. Estes filtros em geral podem ser utilizados tanto diretamente sobre os dados brutos, quanto em modelos de superfície interpolados. O primeiro tem a vantagem de preservar os valores originais de elevação, porém em geral estes algoritmos são complexos e vinculados ao fabricante do equipamento. Já os métodos que se utilizam de superfícies interpoladas, possuem a desvantagem de serem influenciados por erros de interpolação, mas em contrapartida já estão disponíveis em softwares bem difundidos de processamento de imagens (POPESCU, 2002).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi desenvolvido em uma área teste, localizada na Estação Experimental do Canguiri da Universidade Federal do Paraná, município de Pinhais - PR (Figura 09). A área de estudo apresenta elevações variando de 898 a 955 m.

FIGURA 09 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



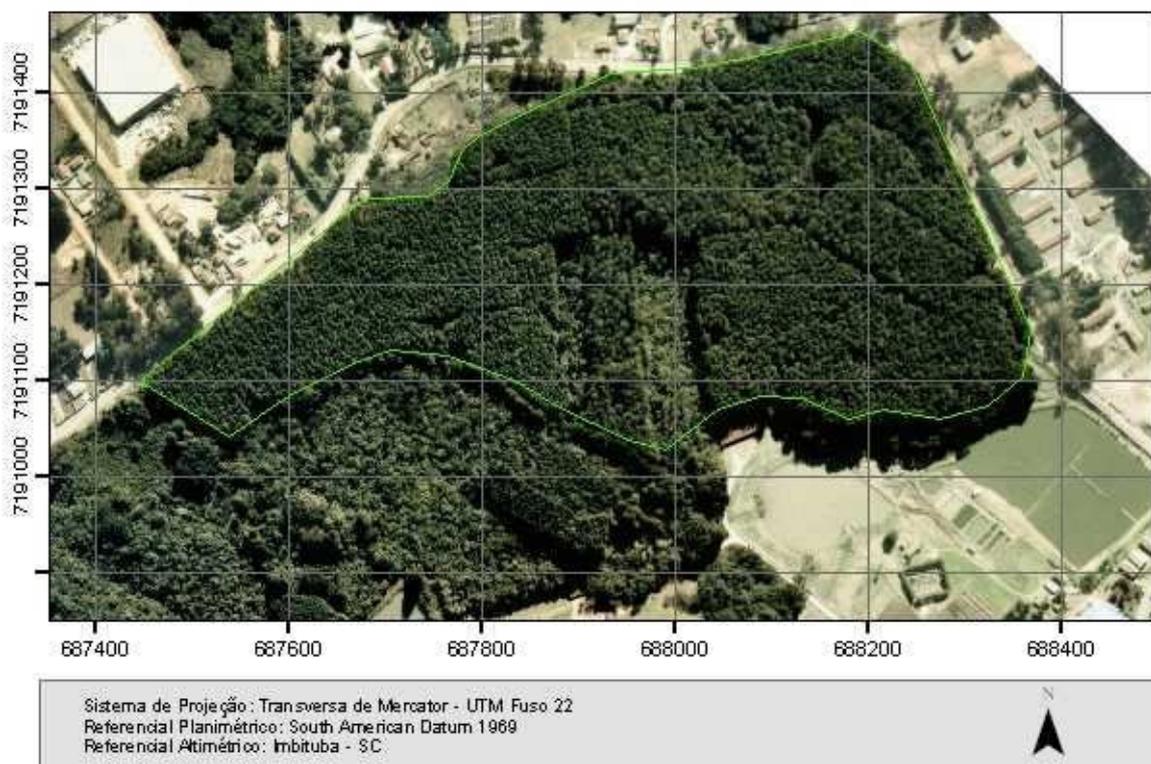
Estação Experimental do Canguiri, UFPR - PR

## 5.2 BASE DE DADOS

### 5.2.1 Inventário Florestal

A área total de *Pinus* sp. inventariada corresponde a 28,9 ha, subdivida em três talhões (A, B e C), sendo utilizado neste trabalho apenas o talhão B (Figura 10). As informações apresentadas a seguir têm como referência o inventário realizado em outubro de 2004 (SANQUETTA, 2004).

FIGURA 10 - ÁREA DE PLANTIO INVENTARIADA (TALHÃO B)



As Tabelas 02 e 03 apresentam, respectivamente, valores médios das variáveis mensuradas e a distribuição diamétrica para o talhão B.

TABELA 02 - VALORES MÉDIOS DAS VARIÁVEIS ESTIMADAS PELO INVENTÁRIO FLORESTAL

TALHÃO	N/ha	DAP MÉDIO (cm)	H MÉDIA (m)	VOLUME MÉDIO m <sup>3</sup> /ha
B	457	36,6	27,5	718,0

Nota: N = Número de árvores; DAP = Diâmetro a altura do peito; H = altura total.

FONTE: SANQUETTA, 2004

TABELA 03 - DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA PARA O TALHÃO B

CLASSES DIAMÉTRICAS (cm)	ÁRV/ha
[0 - 10]	6
[10-20]	12
[20 - 30]	65
[30 - 40]	223
[40 - 50]	125
[50 - 60]	19
[>60]	6

FONTE: SANQUETTA, 2004

A Tabela 04 apresenta o resumo dos resultados obtidos no inventário florestal para o talhão B.

TABELA 04 - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO INVENTÁRIO FLORESTAL – TALHÃO B

ÁREA (ha)	Nº DE PARCELAS	VOLUME MÉDIO		ERRO AMOSTRAL (%)
		Intervalo de confiança (m <sup>3</sup> /ha)		
		Mínimo	Máximo	
20,7	34	655,7	780,3	8,7

FONTE: SANQUETTA, 2004

No inventário realizado em outubro de 2004, os centros das parcelas foram demarcados fisicamente por meio de marcos e suas coordenadas (x,y) tomadas com o auxílio de GPS de navegação (erro posicional médio de  $\pm 30$ m). Embora essas informações sejam importantes para localização das parcelas e futuras medições, não são suficientes para as

necessidades do projeto, uma vez que a precisão dos dados LIDAR é da ordem decimétrica.

Outro requisito essencial a esta pesquisa foi o georreferenciamento de todas as árvores das parcelas, para que não ocorressem dúvidas quanto à correspondência entre as árvores medidas em campo e identificadas nos dados LIDAR.

Tendo em vista às necessidades anteriormente descritas optou-se por instalar novas parcelas em campo, e deste modo, georreferenciar não somente o centro, mas todas as árvores das parcelas. Foi adotado este procedimento também pela dificuldade de se localizar em campo as mesmas parcelas do inventário, e em função de cortes e desbastes ocorridos na área que poderiam interferir nas análises. Para que o cronograma do projeto não sofresse atrasos, definiu-se que as novas amostras contemplariam apenas o talhão B.

Os dados do inventário florestal (SANQUETTA, 2004) foram utilizados para as seguintes finalidades:

- i. Ferramenta auxiliar para a alocação das novas parcelas amostrais;
- ii. Utilização dos modelos ajustados de volume para o talhão B, para comparação com o volume obtido via dados LIDAR.

Uma das limitações da pesquisa foi a impossibilidade de se realizar a cubagem rigorosa das árvores mensuradas, em função de questões judiciais na área que impediram o corte e derrubada das árvores. Sabe-se que a comparação entre dois processos estimativos (equações ajustadas com dados de campo e com dados LIDAR) não é o ideal para verificação da precisão absoluta, porém os resultados poderão servir como um indicativo de precisão relativa entre os métodos. Outros autores realizaram esta mesma abordagem (ver item 4.2).

### 5.2.2 Dados LIDAR

Os dados foram adquiridos através de um sistema a Laser aerotransportado *Optech ALTM 2050 - Airborne Laser Terrain Mapper* (Figura 11), pelo Lactec – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, para atender ao propósito deste projeto de pesquisa. Os parâmetros do voo e as especificações técnicas do sistema estão apresentados respectivamente nas Tabelas 05 e 06.

FIGURA 11 - EQUIPAMENTO OPTECH ALTM 2050



TABELA 05 - PARÂMETROS DO VÔO LIDAR

Data do levantamento	15/08/2005
Altura de voo	1000 m
Velocidade de voo	150 km/h
Ângulo de varredura total	15°
Frequência de perfilamento	58,7 Hz
Diâmetro do feixe	0,27 cm
Comprimento de onda do feixe	1024 nm
Precisões	$\leq 50$ cm na planimetria e $\leq 15$ cm na altimetria

TABELA 06 - ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA ALTM 2050

Altitude de operação	200 – 2000 m nominal
Precisão vertical	<15 cm a 1200 m (1 sigma) <25 cm a 2000 m (1 sigma)
Ângulo de abertura	Variável (0 a $\pm 20^\circ$ )
Largura da faixa de perfilamento	Variável (0 a $\pm 0.72 \times$ altitude)
Frequência de perfilamento	0 – 100 Hz, variável com ângulo de abertura
Precisão horizontal	1/2000 x altitude, (1 sigma)
Receptor GPS	Novatel Millennium
Taxa de repetição do pulso laser	50 kHz
Divergência do feixe	200m @ 0.66 mrad; 650m @ 0.2 mrad, nominal
Intensidade	Registra a intensidade do retorno dos pulsos laser
Medidor de intervalo duplo de tempo	Simultâneos primeiro e ultimo retorno do pulso
Classificação do LASER	Classe IV (FDA CFR 21)
Potência requerida	28 VDC @ 35A
Temperatura operacional	10 – 35° C
Umidade	0 – 95

Fonte: OPTECH INC. (2002)

### 5.2.3 Dados de campo

Com base nos dados inventariados para o talhão B (SANQUETTA, 2004), foram estabelecidos critérios para a alocação das novas parcelas em campo, baseados na distribuição diamétrica e densidade (árvores/ha). A densidade, neste caso, foi considerada como sendo o parâmetro de maior efeito, pois interfere diretamente no percentual de retornos dos feixes laser provenientes do terreno, e, conseqüentemente, na precisão das estimativas de altura e individualização das árvores.

Esses aspectos são discutidos com maior ênfase no capítulo 6. Foram definidas

cinco classes para densidade e DAP (Tabelas 07 e 08 respectivamente) e a combinação destas resultou na distribuição das amostras em campo.

TABELA 07 - DEFINIÇÃO DE CLASSES DE DENSIDADE

CLASSE	DENSIDADE (arv/ha)
1	166 - 266
2	267 - 383
3	384 - 466
4	467 - 616
5	617 - 1016

TABELA 08 - DEFINIÇÃO DE CLASSES DE DAP

CLASSE	DAP (cm)
1	$[\leq 23,00]$
2	$[23,01 - 40,00]$
3	$[40,01 - 43,00]$
4	$[43,01 - 47,00]$
5	$[47,01 - 53,00]$

A aquisição de dados em campo realizou-se entre os dias 29 de abril a 01 de maio de 2006, onde foram alocadas nove parcelas circulares com raio de 10 m, totalizando 186 árvores. Para cada árvore foram registradas as coordenadas (x, y e z), a circunferência à altura do peito (CAP)<sup>1</sup>, altura, posição sociológica (dominante, co-dominante e dominada), qualidade do fuste (torta, bifurcada ou retilínea) e da copa (morta ou viva). A Tabela 09 apresenta um resumo das árvores mensuradas por parcela.

<sup>1</sup> O valor de DAP foi calculado a partir do CAP (  $DAP = CAP / \pi$  ).

TABELA 09 - RESUMO DAS ÁRVORES MENSURADAS POR PARCELA

PARCELA	NÚMERO DE ÁRVORES MEDIDAS		
	Dominantes	Co-dominantes e dominadas	Total
A	13	3	16
B	11	10	21
C	9	9	18
D	13	13	26
E	12	8	20
F	9	6	15
G	9	1	10
I	13	19	32
L	11	16	27
TOTAL	99	87	186

Para o georreferenciamento das árvores e das parcelas, foram utilizados dois receptores geodésicos (LEICA – System 500, modelo SR-530) e uma estação total. A precisão final do levantamento foi de 0,15m nas coordenadas “x” e “y” e 0,25m em “z”, precisão esta julgada compatível para a finalidade de comparação e correlação com os dados LIDAR. As coordenadas foram projetadas para o Sistema UTM - Transversa de Mercator, Fuso 22, com referencial planimétrico no sistema SAD - 69 (*South American Datum 1969*) e referencial altimétrico em Imbituba – SC. Para a transformação das altitudes geométricas em ortométricas aplicou-se uma correção geoidal constante para toda a área de 7,0905 m (conforme base de dados do IBGE).

A medição das alturas das árvores foi realizada com auxílio do hipsômetro Hagga, um instrumento bastante utilizado no meio florestal e foi o método disponível quando da execução dos trabalhos. Vale ressaltar que os valores mensurados serão utilizados apenas para uma comparação relativa entre os métodos, pois espera-se, de acordo com a base de conhecimento adquirida, que as alturas estimadas através dos dados LIDAR possuam precisão superior. Entretanto essa hipótese não poderá ser avaliada neste trabalho, dado que

não foi possível a derrubada das árvores para cubagem e medição da altura real.

O Anexo I apresenta a planilha com as informações coletadas em campo para as parcelas A a L, a parcela H, inicialmente prevista, foi desconsiderada por estar localizada em área que havia sofrido desbaste após a coleta dos dados LIDAR.

#### 5.2.4 Ortofotos da região de estudo

Tendo em vista que as informações disponíveis no inventário são pontuais, elaborou-se uma chave de interpretação para diferentes classes de densidade, com base em ortofotos disponíveis da região. Isso foi realizado com o objetivo de auxiliar na alocação das amostras em campo, uma vez que não haveria tempo hábil para reproduzir todas as amostras originais do inventário.

As características das ortofotos utilizadas estão descritas na Tabela 10.

TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS DAS ORTOFOTOS

Data do levantamento	02/07/2004
Escala	1:10.000
Distância Focal	152,706 mm
Filme	Colorido Normal

## 6 METODOLOGIA

### 6.1 PLANEJAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS LIDAR

A definição de metodologia para processamento de dados LIDAR para finalidades de inventário é o objetivo geral deste projeto de pesquisa. Sendo assim, todos os procedimentos adotados e escolhas realizadas desde a fase de coleta ao processamento propriamente dito, serão apresentadas.

A realização de um projeto utilizando a tecnologia LIDAR envolve, em linhas gerais, quatro etapas:

- i. Planejamento: Compreende a elaboração do plano de voo, que deve considerar os objetivos do projeto, para determinação das características do aerolevante e configurações do equipamento a serem adotados;
- ii. Fase aeroespacial: Realização do voo propriamente dito, armazenamento dos dados brutos e, em processo simultâneo, aquisição dos dados das bases GPS de solo;
- iii. Processamento dos dados brutos: Etapa que reúne os dados das diferentes fontes, como: GPS solo, GPS aéreo, IMU (*Inertial Measurement Unit*), dados laser e dados de calibração, tendo como produto os valores das coordenadas dos pontos mapeados;
- iv. Pós-processamento: Responsável pela classificação dos dados em pontos de terreno e de vegetação, podendo também incluir nesta etapa a geração de produtos como imagens hipsométricas, modelos digitais, etc.

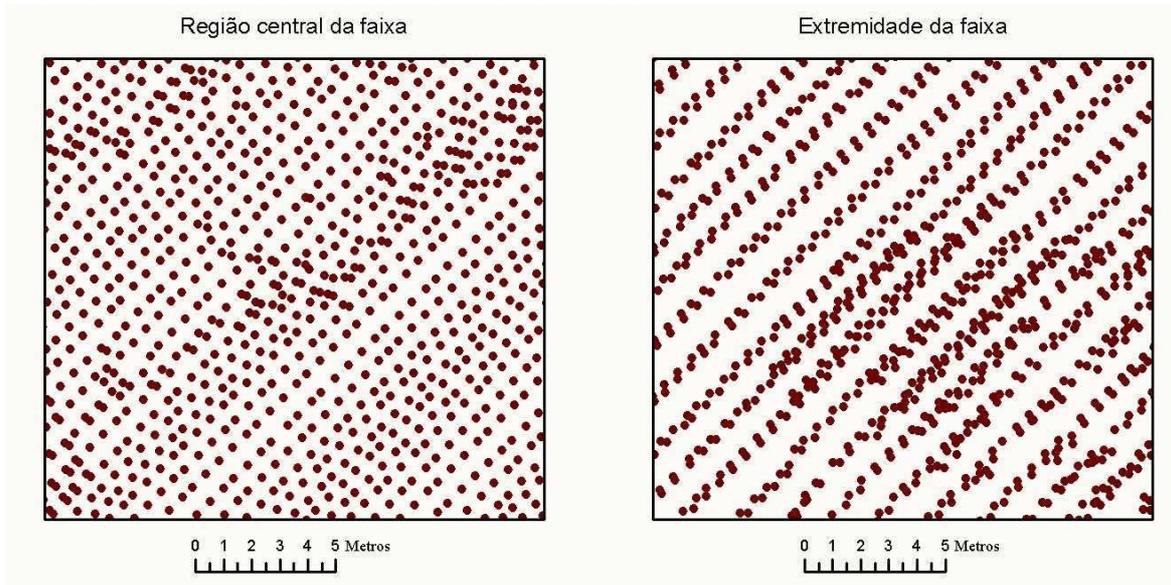
Na fase de planejamento, uma das primeiras questões levantadas foi a definição da configuração ideal para o voo, de modo a atender às finalidades da pesquisa. Para estes casos a literatura indica uma densidade de pontos resultante entre 3 e 5 pontos/m<sup>2</sup> ou acima (ver item 4.2). Para atingir densidade equivalente torna-se necessário a diminuição do ângulo de abertura do sensor e da altura de voo, reduzindo a largura das faixas e, por conseguinte, aumentando o número destas para realizar o recobrimento da área. Essas questões são de grande relevância, principalmente quando se está avaliando o custo do mapeamento, sendo este proporcional às horas de voo.

Estudos que tratem da relação ótima entre custo e precisão nos resultados finais são complexos e onerosos, dada a variabilidade de cenários existentes (equipamentos sensores disponíveis e principalmente das condições da vegetação a ser analisada).

As configurações definidas para o projeto foram conservadoras (ver item 5.2.2), pois procurou-se gerar uma base de dados com alta densidade de pontos, para que em pesquisas futuras possa ser avaliado o efeito da degradação destes dados na precisão final das estimativas.

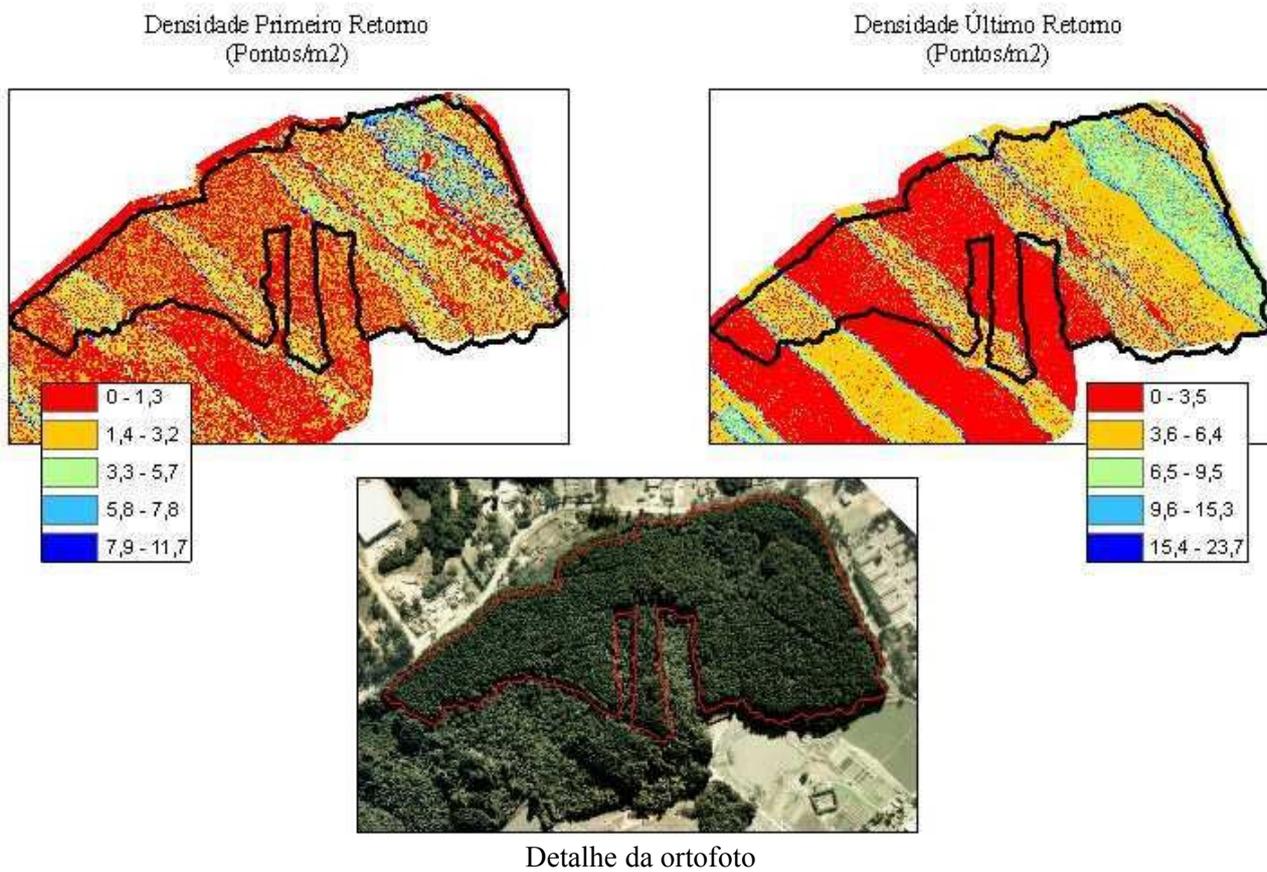
Para a área total mapeada, (correspondente a 378 ha, incluindo grande parte da Estação Experimental do Canguiri) foram necessárias 10 faixas de vôo para o recobrimento total. A Figura 12 apresenta o padrão de coleta dos dados e a distribuição dos pontos para a região do centro e das extremidades das faixas.

FIGURA 12 - PADRÃO DE COLETA DOS DADOS LIDAR



A densidade média de retornos obtida foi de  $6,51 \text{ pontos/m}^2$ , sendo  $1,83 \text{ pontos/m}^2$  para o primeiro pulso e  $4,68 \text{ pontos/m}^2$  para o último pulso, função das características do equipamento e configurações de vôo. A distribuição dos pontos para a área de estudo pode ser observada na Figura 13.

FIGURA 13 - DENSIDADE DE RETORNOS LIDAR PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO RETORNO DO PULSO

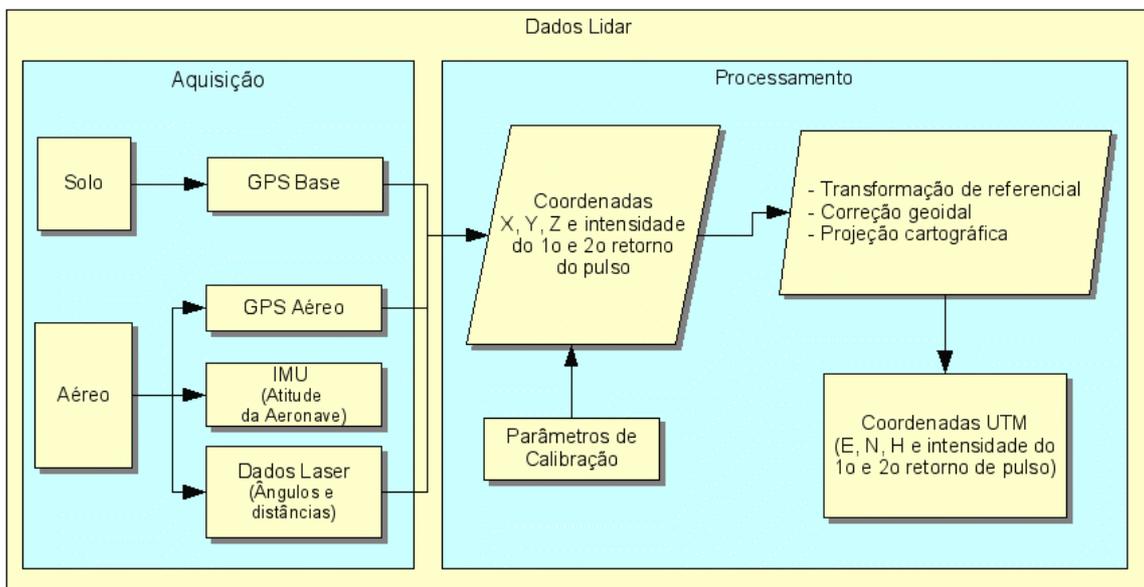


## 6.2 PRÉ - PROCESSAMENTO DOS DADOS BRUTOS

A fase de processamento envolve a extração e decodificação dos dados provenientes do aerolevanteamento e a combinação destes com os dados das bases GPS terrestres. Nessa etapa são inseridos os parâmetros de calibração do sistema que consistem em informações de laboratório e obtidas em vôo, conforme descrito no item 6.2.1. São utilizados os softwares: *Realm Survey Suite* (fornecido pelo fabricante do equipamento) e *Applanix PosPac*, para o processamento de GPS e do sistema inercial.

Em seguida foram realizadas as transformações de referencial e projeção cartográfica. As coordenadas foram projetadas para o Sistema UTM - Transversa de Mercator, fuso 22, com referencial planimétrico no sistema SAD - 69 e altimétrico em Imbituba - SC, com correção geoidal constante para toda a área de 7,0905m. Os mesmos procedimentos foram realizados com os dados adquiridos em campo. O processamento dos dados brutos segue o fluxograma apresentado na Figura 14.

FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DE AQUISIÇÃO DOS DADOS LIDAR



### 6.2.1 Calibração do sistema

A calibração costuma ser realizada em vôo com características específicas (ângulo de abertura e altura), previamente à execução de determinado projeto. O aerolevanteamento é efetuado sobre uma superfície plana<sup>3</sup> e edificação de grande porte<sup>4</sup>, cujas coordenadas são conhecidas através de topografia tradicional. Os parâmetros calibrados são: *offset*, *pitch*, *roll*, escala e elevação. As informações descritas nesta seção foram extraídas de relatórios técnicos, elaborados pelo Lactec – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, e, contemplam os procedimentos utilizados pelo Instituto para calibração do equipamento Optech ALTM 2050.

Através do vôo sobre a edificação, torna-se possível a verificação da precisão horizontal do sistema. Os dados são coletados no modo *Profile*, ou seja, com ângulo de abertura igual a zero e no modo *Scan*, com ângulo de abertura equivalente a 5°, conforme recomendação do fabricante para fins de calibração.

O modo *Profile* é utilizado para determinar o erro posicional que ocorre na direção do vôo. O edifício é utilizado para determinar o quanto o ponto LIDAR está deslocado do real, através do erro angular na direção do vôo (*Pitch*). Estes dados são também utilizados para determinação do parâmetro *offset*, que calibra a verticalidade do sensor. Através do modo *Scan* é possível determinar o erro angular paralelo à direção do vôo (*Roll*).

Para verificação da precisão relativa e absoluta da elevação dos pontos LIDAR são utilizados pontos de controle, levantados sobre uma superfície plana através de métodos convencionais. A cada vôo, um mínimo de quatro linhas de vôo devem passar sobre a área de controle usando uma mesma densidade de pontos com um ângulo de abertura igual a 20°.

Para verificação do *offset* foram analisados os dados de laser obtidos no modo *profile*. Arquivos binários, contendo valores de alcance e ângulo dos feixes laser, foram convertidos para ASCII e verificados quanto à verticalidade (a variação deve ser menor que 0,01°). Para verificação de variações no valor de *escala* foram realizados vôos perpendiculares às faixas sobre uma superfície plana. (Este valor não deve apresentar variação superior a 0,1°).

<sup>3</sup> Aeroporto do Bacacheri, Curitiba – PR. <sup>4</sup>Supermercado Macro, São José do Pinhais - PR.

### 6.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS LIDAR

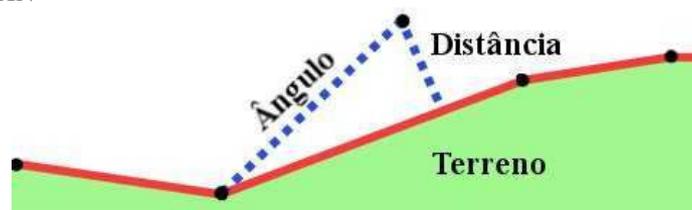
Como produto do processamento dos dados brutos obtém-se um arquivo ASCII com informações das coordenadas do primeiro e último retorno do pulso (E, N, H e intensidade de retorno do sinal) associadas ao tempo GPS.

Para este trabalho foi realizada apenas uma classificação dos pontos de terreno, uma vez que não havia outras estruturas presentes (edificações, infra-estruturas, rios/lagos, etc) relevantes ao estudo. Para a classificação da nuvem de pontos utilizou-se o software *TerraScan* (Terrasolid, Inc.), desenvolvido para o ambiente do software *Microstation* (Bentley).

A rotina de classificação no *TerraScan* consiste em duas fases. Primeiro, o *software* pesquisa os pontos iniciais e constrói um modelo TIN (*Triangulated Irregular Networking*) temporário. Os triângulos nesse modelo estão em sua maioria abaixo do solo, com apenas alguns vértices tocando o terreno. Antes de iniciar esse processo, os verdadeiros pontos mínimos podem ser encontrados através de outra rotina. Frequentemente, alguns pontos ditos mínimos são mais baixos que outros pontos na vizinhança e devem ser removidos.

Na segunda fase de classificação dos pontos de terreno, o *software* começa a ajustar a superfície e de modo iterativo, adiciona mais pontos ao modelo. Cada ponto adicionado torna o modelo cada vez mais próximo da superfície. Os parâmetros de iteração são definidos por ângulos e distâncias (Figura 15), que determinam os pontos que deverão ser ignorados ou adicionados ao modelo.

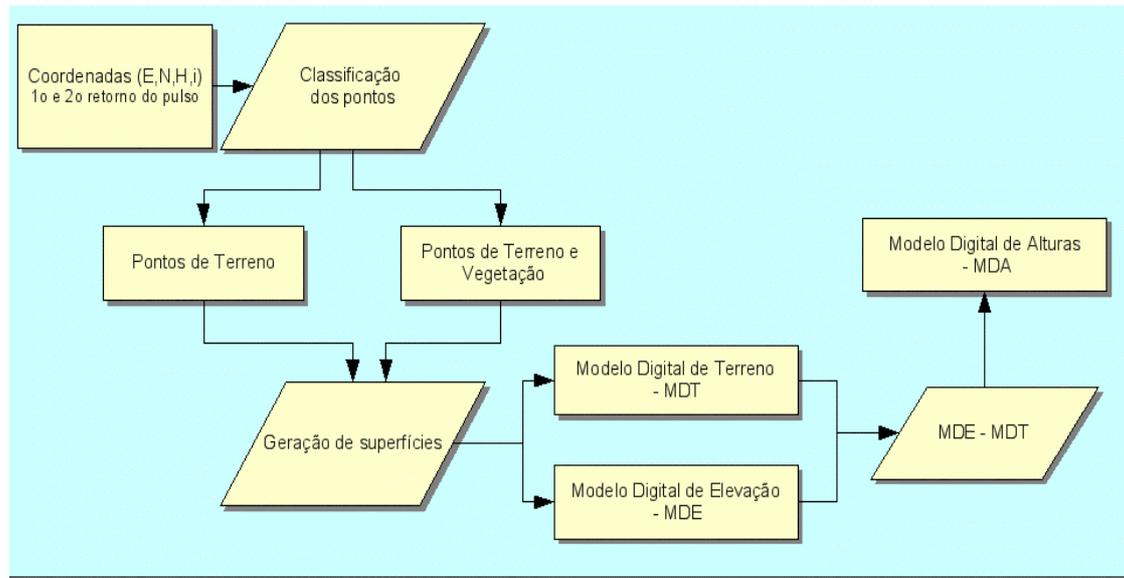
FIGURA 15 - PARÂMETROS DE AJUSTE PARA CLASSIFICAÇÃO NO *TERRASCAN*



### 6.3.1 Geração de modelos digitais

Os procedimentos realizados na fase de processamento podem ser observados no fluxograma apresentado na Figura 16.

FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO DOS DADOS LIDAR



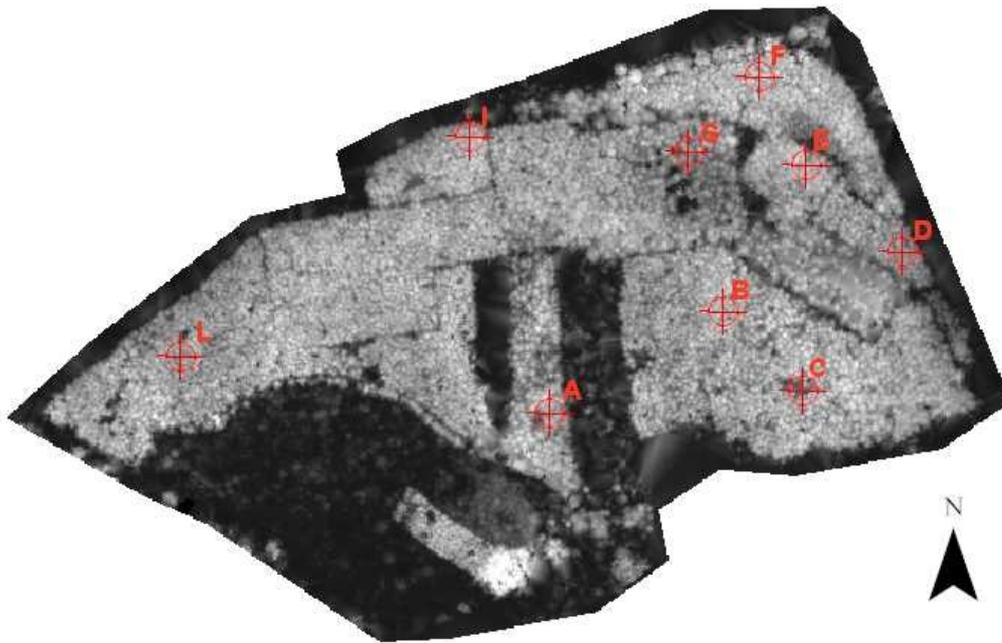
A nuvem de pontos classificada é importada pelo software ArcGIS 9.0 (ESRI) para a geração de superfícies. Optou-se primeiramente pela geração de um TIN (*Triangulated Irregular Network*), baseado na triangulação de Delaunay e em seguida a conversão para um *grid* ou grade retangular usando um método de interpolação linear. Procedimento semelhante foi utilizado por PATENAUDE et al. (2004).

Seguindo essa metodologia foram gerados Modelos Digitais de Terreno – MDT, contendo apenas entidades consideradas pertencentes ao terreno e Modelos Digitais de Elevação – MDE, com todos os pontos. Através da subtração algébrica dos modelos (MDE – MDT) obtêm-se o Modelo Digital de Alturas – MDA. Esse modelo é utilizado como dado de entrada para o algoritmo de delimitação de copas e para a obtenção dos valores de altura dos objetos presentes sobre a superfície do terreno, neste caso os objetos de interesse são as árvores. A resolução espacial utilizada para todos os modelos foi de 0,20m.

## 6.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE CAMPO

Conforme descrito no item 5.2.3, foram alocadas 9 unidades amostrais (parcelas). A distribuição espacial das parcelas pode ser observada na Figura 17.

FIGURA 17 - LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS EM CAMPO



A Tabela 11 apresenta os valores médios obtidos para as variáveis mensuradas em campo (número de árvores, DAP e altura). As informações (posição das árvores e atributos medidos) foram transformadas em um arquivo vetorial no formato *shapefile*, utilizado para fins de comparação com os dados derivados do LIDAR.

TABELA 11 - VALORES MÉDIOS OBTIDOS PARA AS VARIÁVEIS MEDIDAS EM CAMPO

PARCELA	NÚMERO DE ÁRVORES/PARCELA	DAP MÉDIO (cm)	h MÉDIO (m)
A	16	42,15	33,87
B	21	34,80	34,09
C	18	38,17	35,83
D	26	38,48	28,15
E	20	42,04	32,40
F	15	39,19	33,80
G	10	47,11	32,00
I	32	39,26	31,56
L	27	34,70	31,14

Nota: DAP = Diâmetro a altura do peito; h = altura total

## 6.5 AQUISIÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

A questão fundamental deste projeto de pesquisa, é justamente o desenvolvimento de metodologias que permitam a extração de variáveis dendrométricas a partir dos dados LIDAR para estimativas volumétricas. Com o advento dos sistemas comerciais, um aumento significativo de estudos empíricos e análises de algoritmos e metodologias pode ser observado entre os anos de 1999 e 2004 (TIEDE et al. 2005).

Os algoritmos que serão detalhados nos itens seguintes, foram implementados no software ArcGIS 9.0 (ESRI) utilizando a linguagem *Visual Basic for Application* - VBA. A escolha adotada no projeto foi pelo desenvolvimento dos algoritmos utilizando *software* de geoprocessamento, uma vez que grande parte das empresas do setor florestal já utiliza esta tecnologia. Deste modo, toda a base de dados e resultados gerados a partir dos dados LIDAR poderão ser utilizados diretamente em um SIG (Sistema de Informações Geográficas).

A maior parte dos algoritmos desenvolvidos e citados no capítulo 4 utiliza como dado de entrada para a estimativa das alturas um modelo interpolado, incluindo, desta forma, mais um componente de erro nas estimativas. A metodologia a ser apresentada, está baseada no trabalho desenvolvido por TIEDE et al. (2005) e utiliza como dado de entrada para o algoritmo de individualização das árvores, a nuvem de pontos mapeada, minimizando os possíveis erros de interpolação na geração das superfícies.

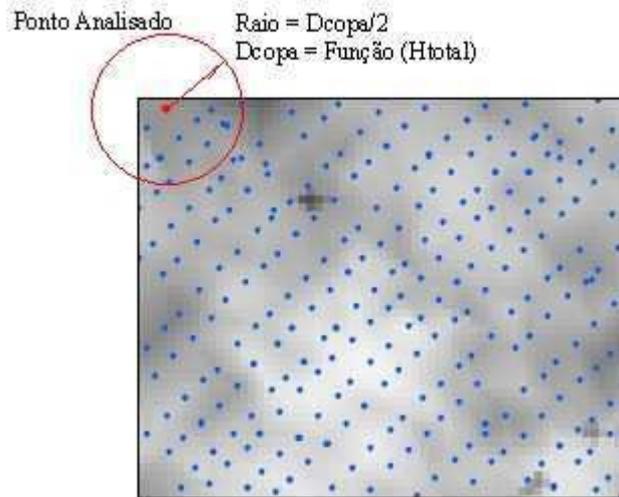
### 6.5.1 Reconhecimento e individualização das árvores

Este procedimento é realizado tendo como parâmetros de entrada, os dados referentes ao primeiro retorno (E, N, H, altura), que correspondem, conforme já mencionado, às reflexões dos topos dos objetos. Para a obtenção da informação de altura, que equivale a distância com relação à superfície do terreno, os pontos mapeados são rebatidos no MDA (Modelo Digital de Alturas).

As árvores foram individualizadas através de um algoritmo de máximas locais, que realiza uma pesquisa espacial na nuvem de pontos (Figura 18). Cada ponto, por sua vez, é analisado para uma vizinhança definida em função de um raio de busca variável. Os valores

dos máximos locais identificados para cada vizinhança, são considerados como topos das árvores.

FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ALGORITMO DE INDIVIDUALIZAÇÃO DE ÁRVORES



A definição do raio de busca é baseada no modelo de regressão (KINI e POPESCU, 2004; citado por TIEDE et al. 2005) que relaciona a variável diâmetro de copa e a altura total individual (3). O raio de busca equivale a  $D_{copa}/2$ .

$$D_{copa} = a + b \cdot H_{total} \quad (3)$$

Onde:

$D_{copa}$  = diâmetro de copa (m);

$H_{total}$  = altura total (m).

Para alimentar o modelo acima descrito e estimar os coeficientes de regressão, foram delineadas manualmente 90 árvores, distribuídas aleatoriamente em toda a área de estudo. Para essa amostra foram tomados os valores de diâmetro de copa e altura baseados nos dados LIDAR. A identificação das árvores assim como a obtenção da altura foi realizada com auxílio do MDA (Modelo Digital de Alturas). As fotografias aéreas foram utilizadas como

apoio para confirmação das informações.

Com base nos dados amostrados, definiu-se os seguintes coeficientes para o modelo de regressão:  $a = -0,092187$ ;  $b = 0,125032$ . Para cada ponto analisado o algoritmo estima o diâmetro de copa a partir do valor de altura, com base nos coeficientes ajustados.

Este algoritmo tende a consumir tempo significativo de processamento, em função do grande volume de dados gerados pelo LIDAR. Existem algumas técnicas para minimizar o gasto computacional que podem ser consideradas, como a filtragem prévia dos dados e a desconsideração de pontos abaixo de uma determinada altura.

### 6.5.2 Delimitação das copas das árvores

Este processo utiliza o produto do algoritmo descrito no item 6.5.1, que corresponde a um arquivo vetorial (pontos) com a informação da localização do topo das árvores, bem como o MDA - Modelo Digital de Alturas. Os topos das árvores são utilizados como pontos-sementes em um algoritmo de crescimento de regiões (adaptado de TIEDE et al. 2005).

Para cada ponto identificado como sendo uma árvore, o algoritmo realiza uma busca no MDA nas 8 direções vizinhas (N, NO, O, SO, S, SE, L e NE). O MDA corresponde a um arquivo do tipo *raster* (matricial), e cada direção a uma célula retangular que armazena como atributo o valor de altura. Cada célula vizinha é comparada em relação ao topo da árvore, e as células cujos valores de altura forem menores que o topo da árvore são incluídas como pertencentes à copa (Figura 19).

FIGURA 19 - DELIMITAÇÃO DAS COPAS



FONTE: Adaptado de TIEDE et al, 2005

Foram estabelecidos três critérios de parada para o algoritmo, de modo a evitar inconsistências na geração das copas. Os critérios foram definidos através de análise visual preliminar dos dados LIDAR.

- i) Considera-se como copa, células cujo valor da altura é maior ou igual a 10 metros;
- ii) As células cujo valor de altura for menor ou igual a 85% da altura total serão ignoradas;
- iii) Diâmetro de copa máximo deverá ser menor ou igual a 5 metros.

O procedimento é repetido enquanto as condições forem satisfeitas e todas as copas delineadas. O tempo de processamento tende a ser elevado em função do tamanho da célula do raster, neste caso de 20 cm, e do número de árvores identificadas. Embora este seja um

aspecto relevante, não foi objeto desta pesquisa a avaliação e otimização dos recursos computacionais.

Para a geração das copas utilizou-se um filtro de moda retangular (3 x 2 m), com o objetivo de suavizar a imagem raster, evitando a formação de picos e depressões dentro de uma mesma copa, e neste caso, causando erros na delimitação automática. Estas variações (picos ou depressões) ocorrem em função da alta resolução espacial dos dados, fazendo com que pequenas diferenças de elevação possam ser percebidas.

## 6.6 ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL

### 6.6.1 Análise estatística dos modelos de volume

A análise estatística dos modelos foi realizada com base nos seguintes critérios: coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), índice de Schlaegel (IA), erro padrão da estimativa percentual ( $Sy_x \%$ ), recalculado para as equações onde a variável dependente sofreu transformações, bem como a análise gráfica dos resíduos de regressão.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) expressa a quantidade de variação da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes. Ao se ajustar a reta se espera que ela explique o conjunto de dados coletados. Se os dados estiverem todos contidos numa reta teremos uma reta de regressão coincidente com os dados levantados. Nesse caso o somatório dos desvios ao quadrado será nulo e, o ajuste da reta será completo. O erro padrão existirá sempre que o poder de explicação da equação não for completo. O valor do erro significa que existem outros fatores que interferem no comportamento da variável dependente além das variáveis independentes incluídas no modelo.

Neste caso, utilizou-se o valor de  $R^2_{aj}$  (7), por se tratar de equações com números diferentes de coeficientes e o índice de Schlaegel (8), para equações transformadas. Para corrigir a discrepância logarítmica, utilizou-se o fator de Meyer (9).

$$R^2_{aj} = 1 - \left\{ (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p} \right\}$$

$R^2_{aj}$  = Coeficiente de determinação ajustado

$$R^2 = \frac{\sum (y'_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

$y'_i$  = valores estimados  
 $y$  = média aritmética de  $y$  em unidades reais  
 $y_i$  = valores observados  
 $n$  = tamanho da amostra  
 $p$  = número de coeficientes do modelo

$$I. A. = 1 - \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

$I. A.$  = Índice de Schlaegel

$$Fator\ de\ Meyer = e^{0,5 \cdot S_{yx}^2} \quad (9)$$

O erro padrão da estimativa -  $S_{yx}$  (10) expressa o desvio médio entre os valores reais e os valores estimados ao longo da linha de regressão. Quanto menor for o valor percentual de  $S_{yx}$ , melhor terá sido o ajuste. Para os modelos onde a variável dependente sofreu transformação, foi necessário recalculá-lo o erro padrão residual para que os resultados pudessem ser comparáveis estatisticamente.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}} \quad (10)$$

$$S_{yx} = \frac{S_{yx}}{\hat{y}} \cdot 100$$

Todos os modelos ajustados foram submetidos à análise gráfica dos resíduos de regressão, com o objetivo de verificar se o ajuste da equação foi bom ao longo de toda a linha estimativa, se houve tendenciosidade, se os resíduos são independentes e se a variância é homogênea. Os resíduos (valor percentual) foram calculados através da equação (11):

$$Resíduos = \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

### 6.6.2 Estimativa do volume individual com casca

A estimativa do volume individual com casca foi realizada com base nas equações ajustadas no inventário florestal (SANQUETTA, 2004). Conforme já mencionado, não foi possível realizar a cubagem rigorosa das árvores mensuradas, neste caso, optou-se por efetuar uma comparação relativa entre o volume estimado pelo inventário e o volume estimado através dos dados LIDAR.

O modelo utilizado foi o polinômio do 5º grau (4). Os coeficientes estimados estão apresentados na Tabela 12.

$$d_i = d \left[ \beta_0 - \beta_1 \frac{h_i}{h} + \beta_2 \left( \frac{h_i}{h} \right)^2 - \beta_3 \left( \frac{h_i}{h} \right)^3 + \beta_4 \left( \frac{h_i}{h} \right)^4 - \beta_5 \left( \frac{h_i}{h} \right)^5 \right] \quad (4)$$

Onde:

$d_i$  = diâmetro correspondente a uma altura  $h_i$  (cm)

$d$  = diâmetro a 1,30m de altura (cm)

$h$  = altura total (m)

$h_i$  = altura equivalente a um diâmetro  $d_i$  (m)

TABELA 12 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA O POLINÔMIO DO 5º GRAU

$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$R^2$	Syx	Syx %
1,202	-4,396	21,606	-50,220	51,266	-19,506	0,957	0,063	7,73%

Nota:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  são os coeficientes de regressão ajustados pelo Inventário Florestal.

FONTE: SANQUETTA, 2004

A estimativa do volume total individual foi realizada através da integração da função de afilamento (Polinômio do 5º grau), conforme equação (5):

$$\hat{V} = \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 dh \quad (5)$$

O resultado desta integração pode ser observado na equação (6):

$$\begin{aligned} \hat{v} = & \frac{34,58945782 d^2 (h_2^{11} - h_1^{11})}{h^{10}} - \frac{199,9989192 d^2 (h_2^{10} - h_1^{10})}{h^9} + \frac{509,7094884 d^2 (h_2^9 - h_1^9)}{h^8} \\ & - \frac{749,0062890 d^2 (h_2^8 - h_1^8)}{h^7} + \frac{701,2645063 d^2 (h_2^7 - h_1^7)}{h^6} - \frac{444,6216227 d^2 (h_2^6 - h_1^6)}{h^5} \\ & + \frac{206,3193880 d^2 (h_2^5 - h_1^5)}{h^4} - \frac{77,67220800 d^2 (h_2^4 - h_1^4)}{h^3} + \frac{23,75521333 d^2 (h_2^3 - h_1^3)}{h^2} \\ & - \frac{5,283992000 d^2 (h_2^2 - h_1^2)}{h} + 1,444804000 d^2 (h_2 - h_1) \quad (6) \end{aligned}$$

Onde:

$\hat{v}$  = Volume total com casca ( $m^3$ )

$h_2$  = Altura total (m)

$h_1$  = Altura do toco (0,1m)

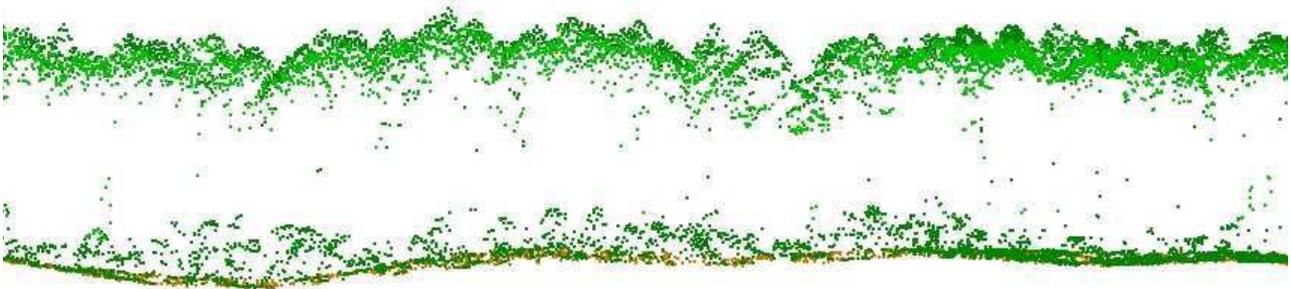
Para todas as árvores mensuradas em campo (Parcelas A a L), calculou-se o volume total individual com base na equação (6). Esses valores foram considerados como sendo o volume de referência e utilizados para ajustar modelos volumétricos com base nos dados LIDAR.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1 CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS LIDAR

Como resultado do processamento dos dados LIDAR descritos no capítulo 6, obteve-se a nuvem de pontos classificada em pontos de terreno e vegetação (Figura 20).

FIGURA 20 - NUVEM DE PONTOS CLASSIFICADA



Com a interpolação dos pontos LIDAR foram gerados modelos de terreno e modelos de elevação com resolução espacial de 0,2m (Figura 21).

FIGURA 21 - MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO E DE TERRENO (MDE E MDT)

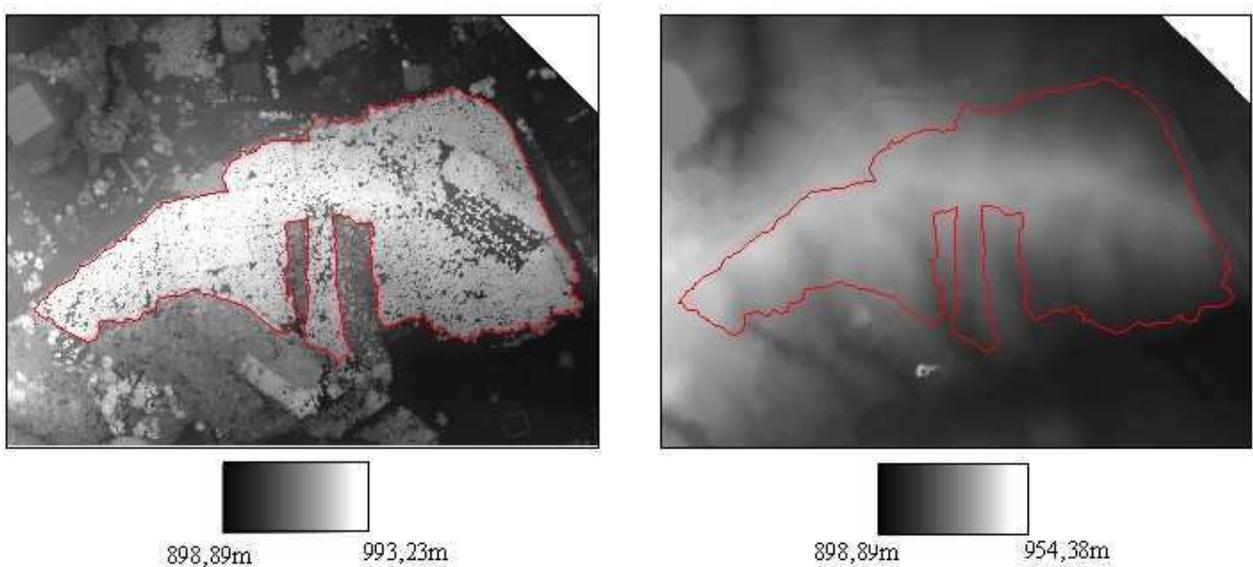
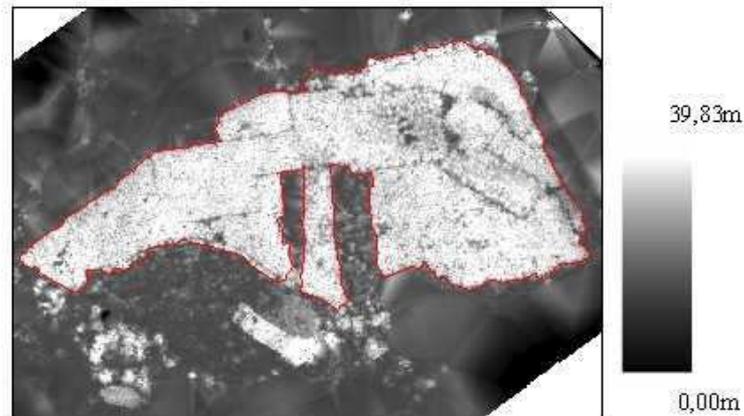


FIGURA 22 - MODELO DIGITAL DE ALTURAS - MDA



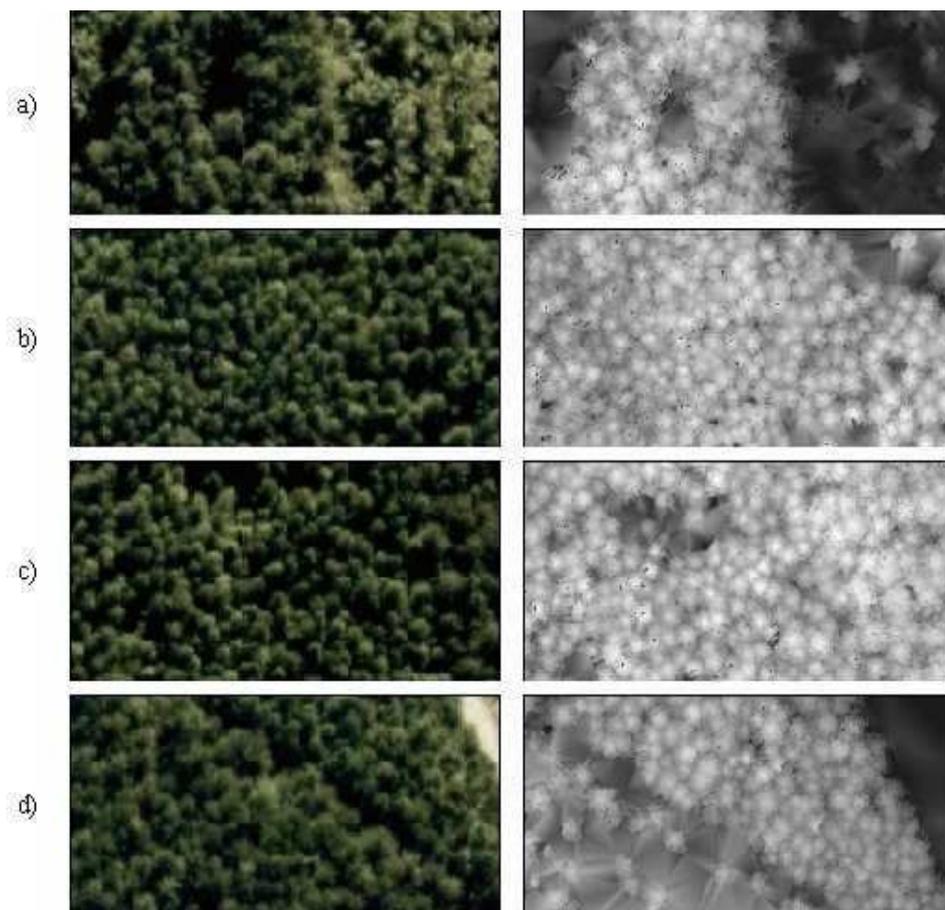
A diferença algébrica entre o Modelo Digital de Terreno e o Modelo Digital de Elevação corresponde ao Modelo Digital de Alturas (Figura 22). O Modelo Digital de Alturas – MDA foi utilizado no processo de estratificação da vegetação com base no atributo da altura e no algoritmo de delimitação das copas.

## 7.2 ESTRATIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO

### 7.2.1 Chave de Fotointerpretação

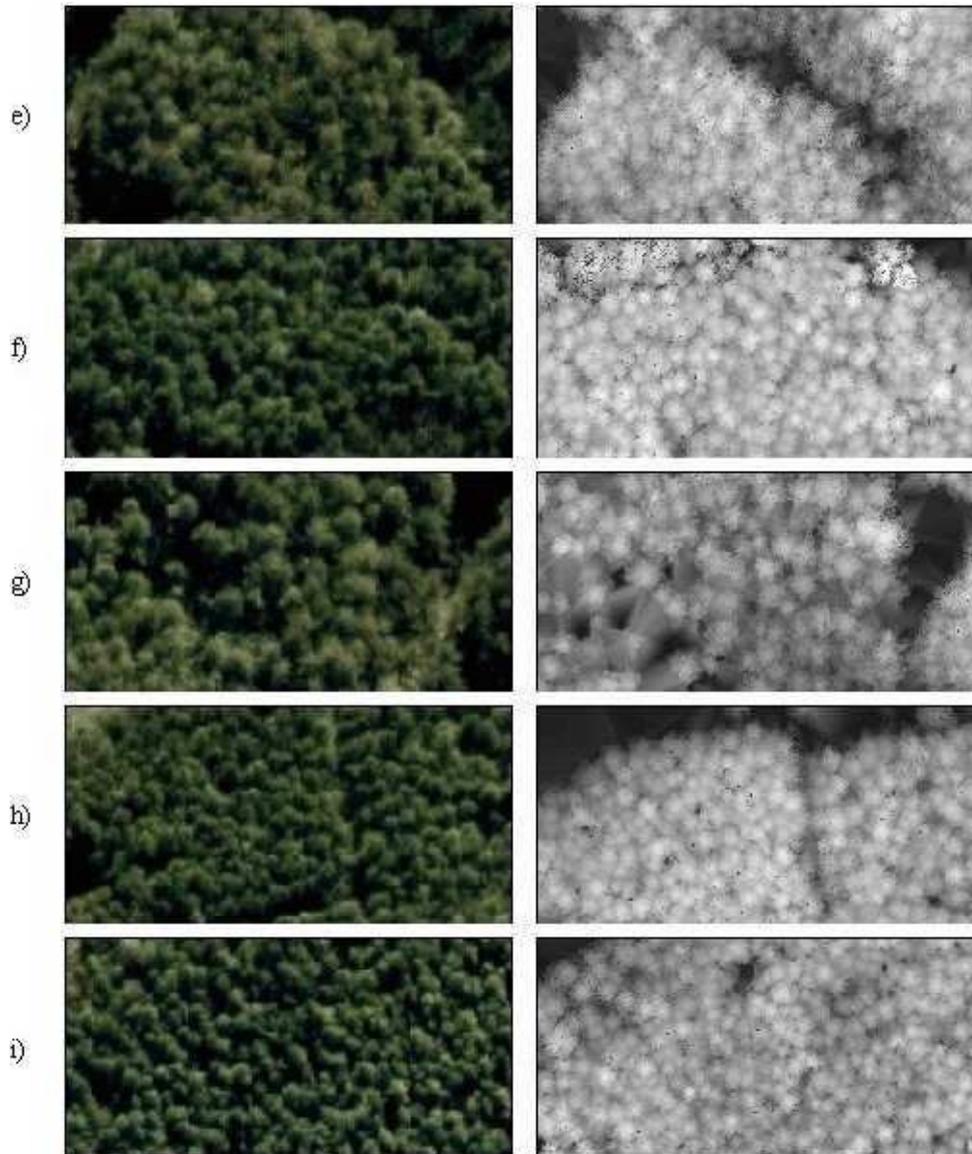
As Figuras 23 e 24 apresentam a chave de interpretação elaborada, com as informações das fotografias e do MDA (Modelo Digital de Alturas obtidos dos dados LIDAR) para a mesma região. Pode-se observar que as imagens apresentam diferenças para algumas regiões. Isso ocorreu em função da data na aquisição dos dados, as fotografias aéreas são de 2004 e os dados LIDAR de 2005. Algumas regiões sofreram desbastes e apresentam-se modificadas, porém este fato não comprometeu a estratificação e houve o cuidado de alocar as parcelas em áreas que não haviam sofrido alteração.

FIGURA 23 - CHAVE DE FOTOINTERPRETAÇÃO - ORTOFOTO E DADOS LIDAR (PARCELAS A a D)



Nota: a) Parcela A; b) Parcela B; c) Parcela C; d) Parcela D

FIGURA 24: CHAVE DE FOTOINTERPRETAÇÃO - ORTOFOTO E DADOS LIDAR (PARCELAS E a L)

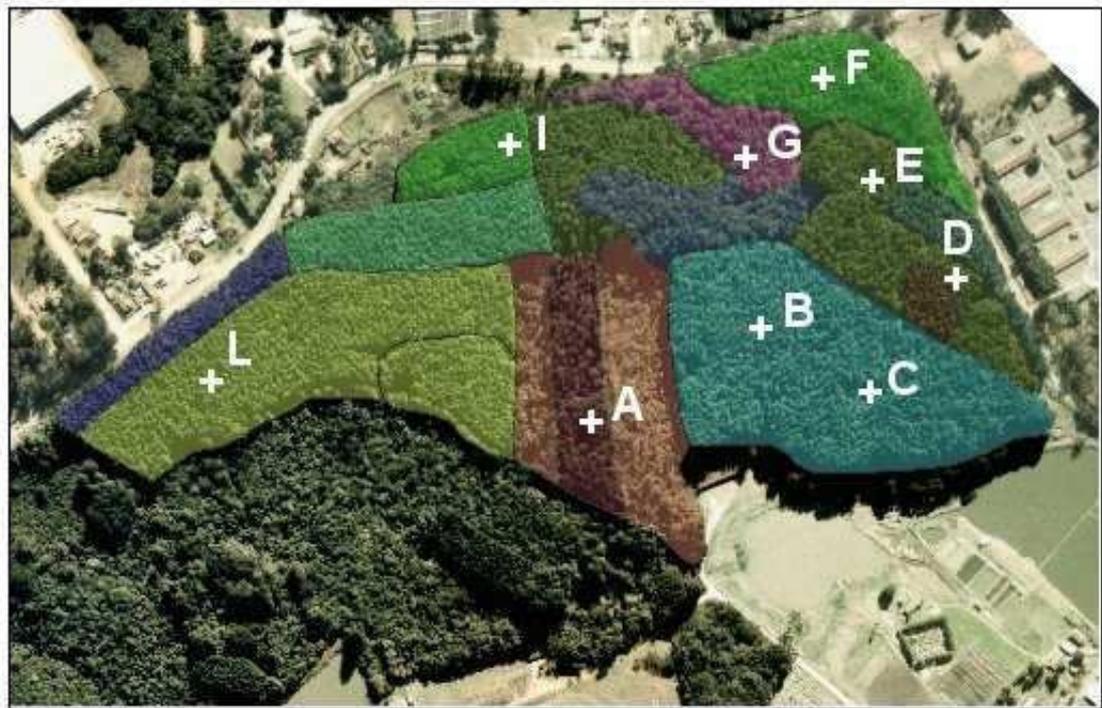


Nota: Nota: e) Parcela E; f) Parcela F; g) Parcela G; h) Parcela I; i) Parcela L

### 7.3.2 Estratificação da vegetação

Com base na chave de interpretação elaborada, realizou-se uma estratificação da vegetação com base no atributo altura derivado dos dados LIDAR. A Figura 25 apresenta o resultado da estratificação e a distribuição das parcelas em campo.

FIGURA 25 - ESTRATIFICAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



### 7.3 RECONHECIMENTO E INDIVIDUALIZAÇÃO DAS ÁRVORES

As árvores identificadas automaticamente através do algoritmo descrito no item 6.5.1, foram comparadas com àquelas reconhecidas e mensuradas em campo. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos:

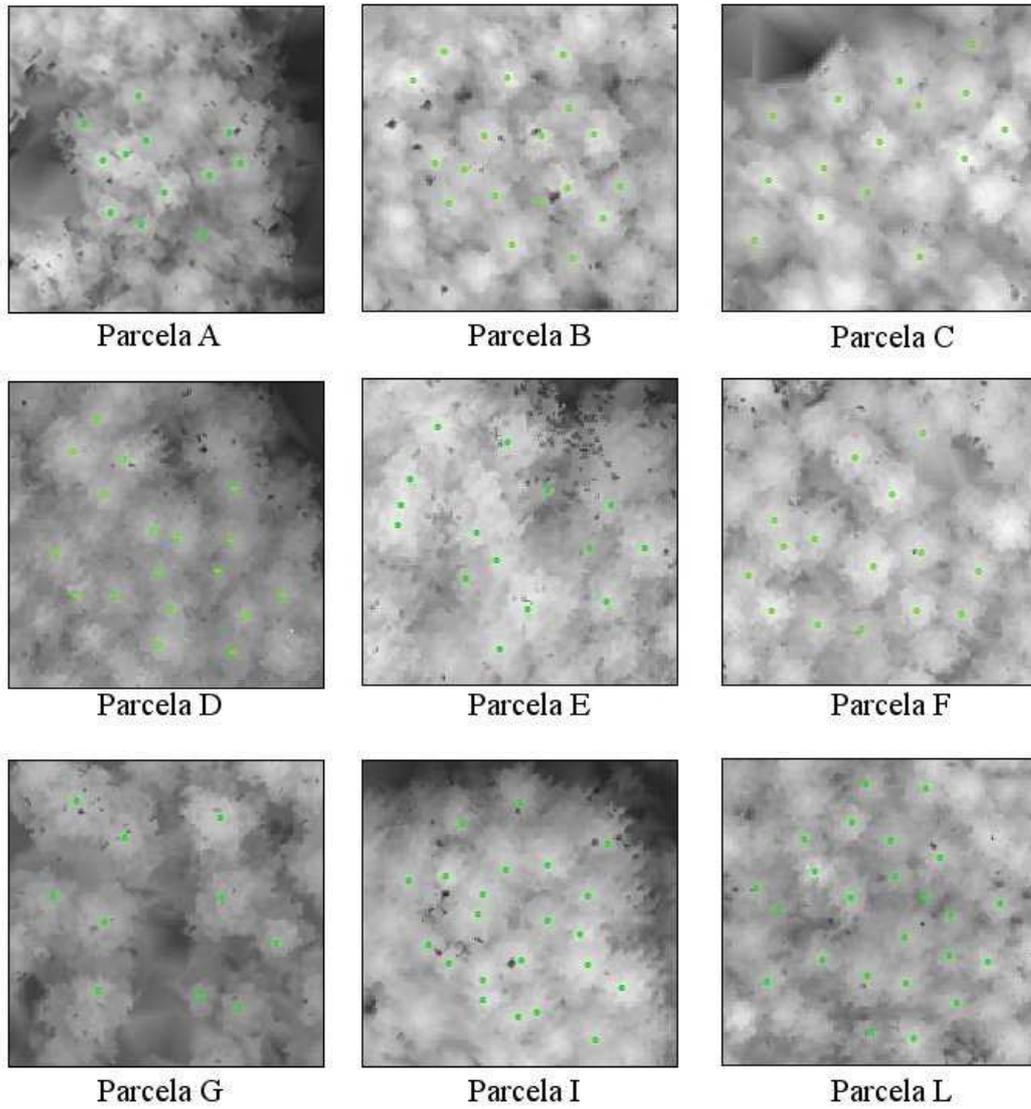
TABELA 13 - IDENTIFICAÇÃO DAS ÁRVORES

PARCELA	ÁRVORES MEDIDAS EM CAMPO		ALGORITMO DE INDIVIDUALIZAÇÃO DE ÁRVORES		ACERTO (%)	
	Total	Dominantes	Total	Dominantes	Total	Dominantes
A	16	13	14	12	87,5	92,3
B	21	10	18	9	85,7	90,0
C	18	9	17	9	94,4	100,0
D	26	13	18	12	66,7	92,3
E	20	12	15	11	75,0	91,7
F	15	9	15	9	100,0	100,0
G	10	9	10	9	100,0	100,0
I	32	13	22	13	68,7	100,0
L	27	11	25	11	92,6	100,0
<b>TOTAL</b>	<b>186</b>	<b>99</b>	<b>154</b>	<b>95</b>	<b>82,8</b>	<b>95,9</b>

NOTA: O percentual de acerto foi calculado para o total das árvores (incluindo: Dominantes, Co-dominantes e Dominadas) e considerando somente as Dominantes.

Considerando todas as parcelas medidas em campo, atingiu-se um percentual de acerto de 82,8% (incluindo dominantes, co-dominantes e dominadas). Referindo-se somente às dominantes, o percentual de acerto foi de 95,9%. Observa-se que para as parcelas “D”, “E” e “I” o algoritmo obteve desempenho inferior, sobretudo quando avaliadas todas as árvores. Estas parcelas encontram-se em áreas mais densamente povoadas, fato este que exerce influência direta na penetração dos feixes Laser no terreno, como já observado na revisão de literatura. A identificação das árvores pode ser observada na Figura 26.

FIGURA 26 - RESULTADO DO ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DAS ÁRVORES



#### 7.4 OBTENÇÃO DA VARIÁVEL ALTURA

Realizou-se a comparação entre as alturas mensuradas em campo, conforme procedimento descrito no item 5.2.3, e as alturas extraídas dos dados LIDAR.

Não foi possível a derrubada das árvores para realização de cubagem rigorosa e obtenção das alturas, portanto a Tabela 14 apresenta uma comparação relativa entre os métodos de mensuração em campo e através dos dados LIDAR.

TABELA 14 - DIFERENÇA ENTRE AS ALTURAS MEDIDAS EM CAMPO E ATRAVÉS DOS DADOS LIDAR

PARCELA	ALTURA MÉDIA (m)		RESÍDUOS (%)
	Campo	LIDAR	Médio
A	33,87	30,99	7,95
B	34,09	32,66	4,19
C	35,83	32,95	6,92
D	28,15	28,97	0,10
E	32,40	32,08	5,84
F	33,80	32,90	4,17
G	32,00	29,16	8,88
I	31,56	31,78	3,96
L	31,14	30,32	3,75

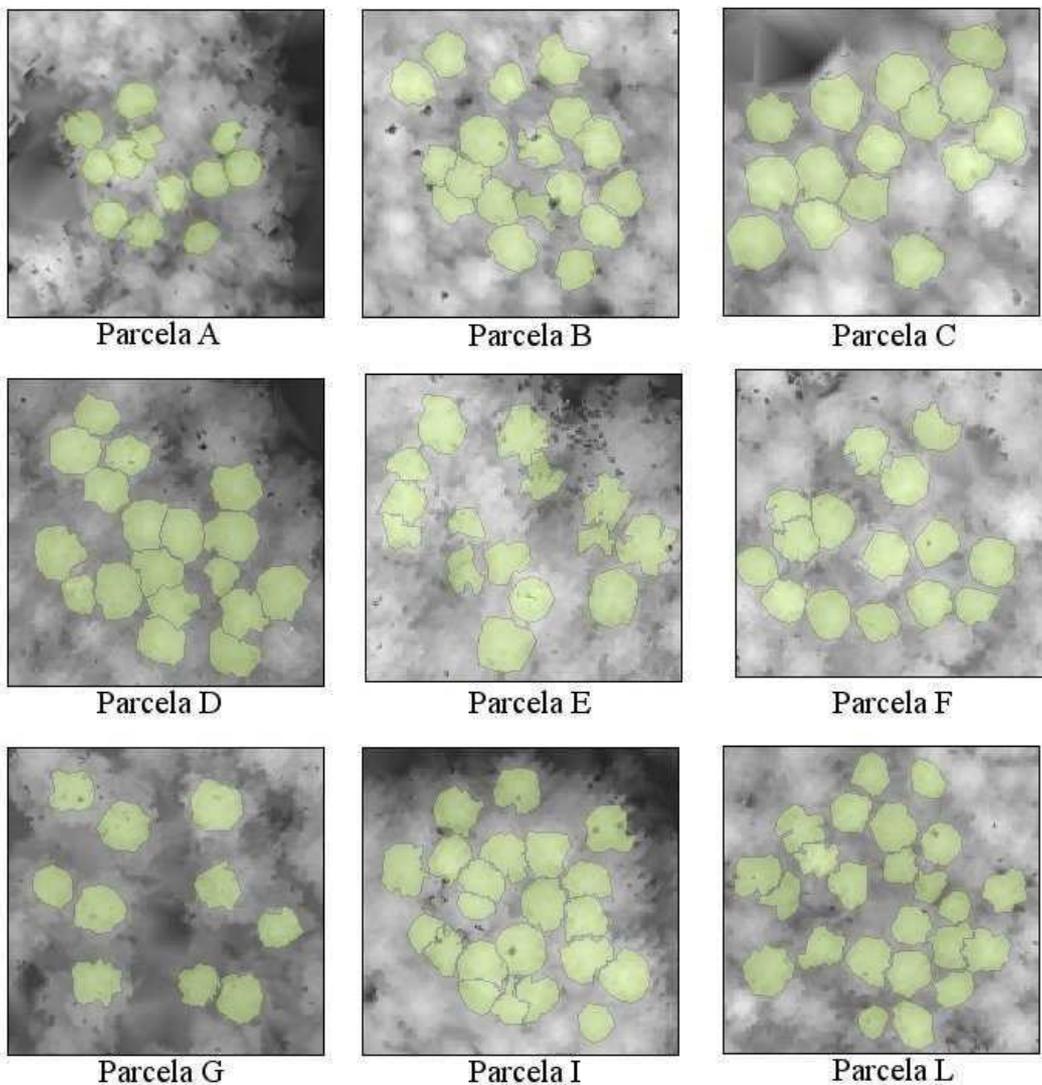
O resíduo médio foi calculado a partir da diferença entre o valor de cada altura obtida em campo e através dos dados LIDAR, para cada parcela e calculado o valor médio. Observa-se que a média dos valores de altura por parcela medidos em campo são maiores que os estimados pelos dados LIDAR. Esta tendência dos dados LIDAR de subestimar as alturas já foi identificada em outros trabalhos (FRIEDLAENDER e KOCH, 2000; NILSSON, 1996; NAESSET, 1997a). Porém, neste caso, não é possível avaliar a magnitude absoluta do erro das estimativas de altura, em função da baixa precisão do hipsômetro.

## 7.5 DELIMITAÇÃO DAS COPAS DAS ÁRVORES

As copas das árvores foram delimitadas automaticamente através do algoritmo descrito no item 6.5.2. Os resultados obtidos foram comparados visualmente através das ortofotos e dos dados LIDAR (Modelo Digital de Alturas). Não se realizou medições das copas em campo, em função das dificuldades operacionais de obtenção desta variável.

A Figura 27 apresenta o resultado da delimitação das copas das árvores para as parcelas mensuradas.

FIGURA 27 - RESULTADO DO ALGORITMO DE DELIMITAÇÃO DAS COPAS



## 7.6 MODELAGEM DO VOLUME INDIVIDUAL

Uma das características da tecnologia LIDAR é a obtenção de informações acerca da estrutura das copas das árvores e a mensuração precisa da altura (ver item 4.2). Grande parte do esforço deste projeto foi, justamente, o desenvolvimento de metodologias para extração de variáveis dendrométricas, que apresentassem alta correlação com volume individual.

Partindo da premissa que o DAP é a variável que melhor explica o volume e esta variável não pode ser obtida diretamente dos dados LIDAR, foram ajustados modelos para estimar o DAP em função de variáveis possíveis de serem obtidas pelo LIDAR, como a área de copa e a altura total.

Inicialmente considerou-se o ajuste de um modelo global, para toda a área de estudo. Essa consideração teve como base o inventário realizado em 2004, que por sua vez definiu para a mesma área, uma única equação preditiva para o volume. Entretanto, a análise criteriosa da vegetação indicou considerável heterogeneidade, principalmente quanto à densidade do povoamento e a presença de diferentes espécies de *Pinus*. Com base na chave de fotointerpretação elaborada realizou-se uma estratificação da área de estudo.

Sendo assim, optou-se por realizar o ajuste dos modelos por estrato, neste caso, como as parcelas de campo já estão distribuídas em diferentes estratos (exceção das parcelas B e C), os modelos serão definidos por parcela. O intervalo de confiança das estimativas corresponde ao limite geográfico de cada estrato ao qual pertence a amostra.

### 7.6.1 Estimativa do diâmetro à altura do peito (DAP)

Utilizando como variáveis independentes as informações derivadas dos dados LIDAR, tem-se que (12):

$$DAP' = f(\text{Área de Copa}, H_{\text{Laser}}) \quad (12)$$

Foram ajustados modelos relacionando a variável DAP medida em campo, com as variáveis: Área de Copa, H<sub>Laser</sub> e transformações destas (aplicação de logaritmo, elevação da variável ao quadrado, ou ao cubo e produto cruzado). Com auxílio do software *Statgraphics*, foram selecionados os conjuntos de variáveis mais significativos, com base no

Coeficiente de Determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ).

Quando se realizou o ajuste global, considerando todas as árvores mensuradas, observou-se árvores com valores discrepantes (*outliers*). Esses valores fizeram com que o modelo global não se ajustasse adequadamente ao conjunto de dados, optando-se pelo ajuste dos modelos por estrato, conforme citado no item 7.4.

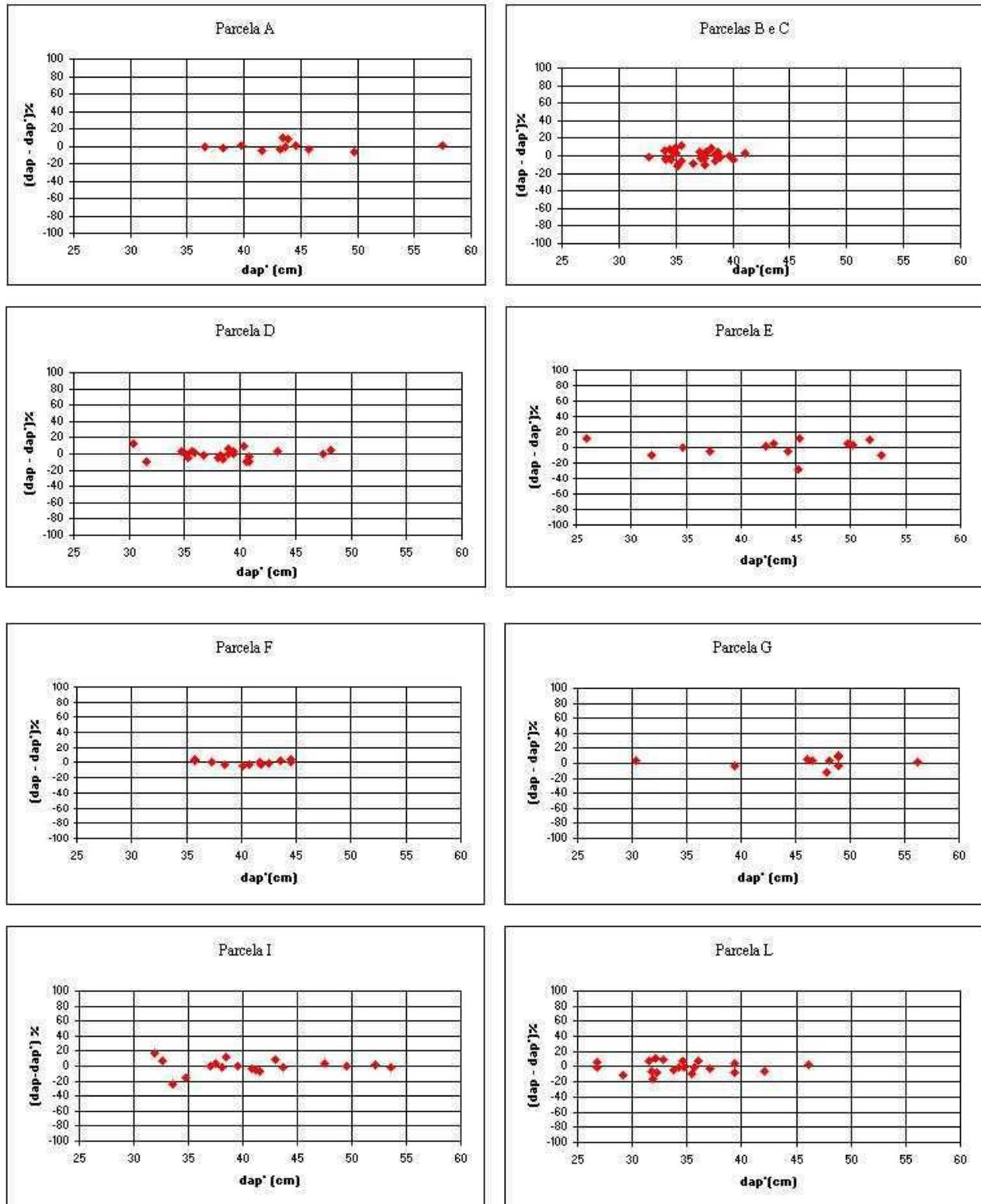
A Tabela 15 apresenta as equações ajustadas por parcela e os parâmetros estatísticos calculados para cada modelo: Coeficiente de Determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), Índice de Schlaegel (IA) e Erro Padrão da Estimativa percentual (Syx %), recalculado quando necessário.

TABELA 15 - MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DE DAP – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Parcela	Variável Dependente	Parâmetros Estimados		IA	R <sup>2</sup> aj	Syx	Syx (%)
A	DAP	Constante (b0)	-23891,9	0,86	0,73	3,06	6,96
		HLaser	101,73				
		AreaCopa	-207,28				
		lnHlaser	-3064,3				
		lnAreaCopa	7933,92				
		1/lnAreaCopa	34986,4				
B, C	DAP	Constante (b0)	-1909,96	0,491	0,432	2,25	6,13
		HLaser	14,03				
		1/lnHLaser	5175,77				
		AreaCopa <sup>2</sup>	0,01599				
D	DAP	Constante (b0)	-49079,5	0,79	0,73	2,51	6,49
		HLaser	-2045,68				
		lnHLaser	27461,3				
		lnAreaCopa	15,16				
		HLaser <sup>2</sup>	18,94				
E	DAP	Constante (b0)	114,42	0,78	0,67	5,34	12,53
		AreaCopa	43,32				
		HLaser <sup>2</sup>	0,08175				
		lnAreaCopa	-210,83				
		AreaCopa <sup>2</sup>	-1,04				
F	DAP	Constante (b0)	3052,09	0,86	0,81	1,40	3,44
		AreaCopa	307,29				
		lnAreaCopa	-2417,41				
		AreaCopa <sup>2</sup>	-4,79				
G	LnDAP	Constante (b0)	-8429,04	0,82	0,73	4,01	8,51
		Hlaser	-304,07				
		lnHlaser	4478,95				
		HLaser <sup>2</sup>	2,58				
I	DAP	Constante (b0)	7420,44	0,80	0,73	3,56	8,71
		HLaser	109,57				
		AreaCopa	-150,24				
		lnHlaser	-3400,08				
		lnAreaCopa	-1990,92				
		AreaCopa <sup>1/2</sup>	2205,92				
L	DAP	Constante (b0)	34573,9	0,77	0,65	3,11	8,99
		HLaser	106,67				
		AreaCopa	16,52				
		lnAreaCopa	-116,77				
		lnHlaser	-6989,83				
		1/lnHlaser	-46449,9				
		1/lnAreaCopa	-240,27				

A Figura 28 apresenta a distribuição dos resíduos de regressão para os modelos ajustados por parcela.

FIGURA 28 - ANÁLISE DE RESÍDUOS DE REGRESSÃO - DAP'



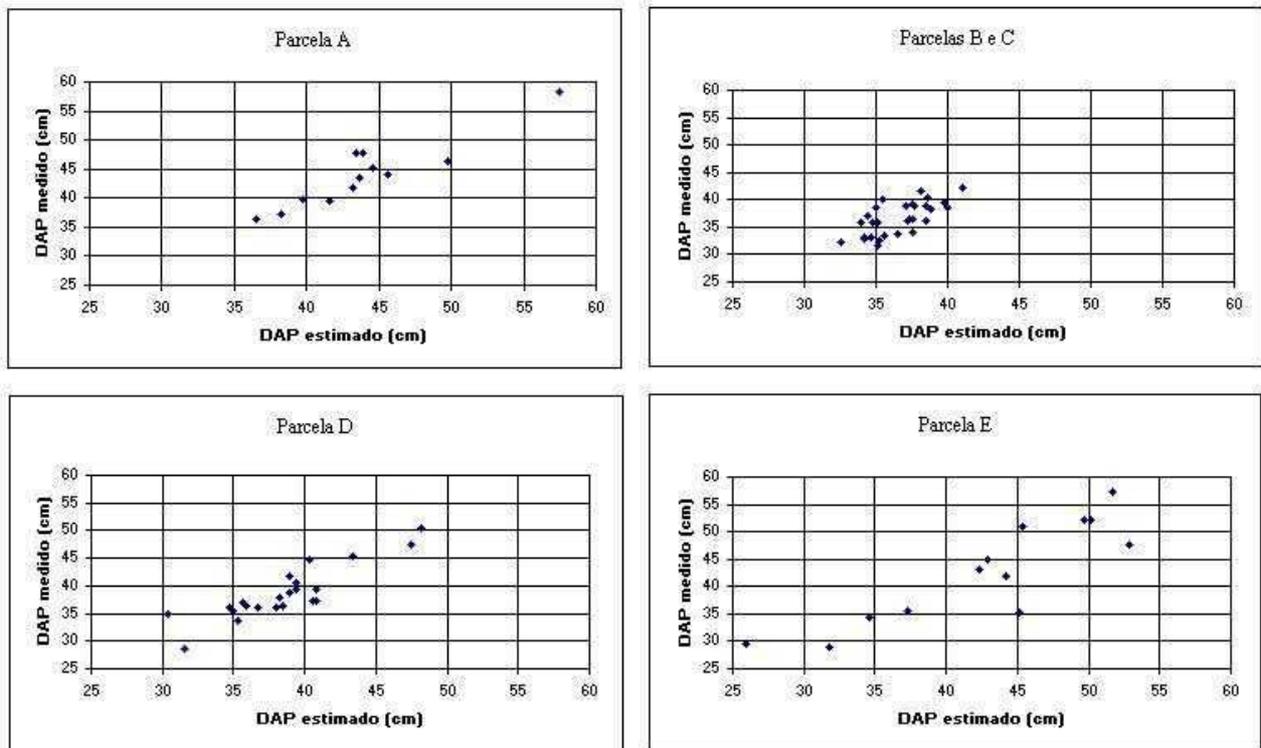
Observa-se que os resíduos estão bem distribuídos para toda a amplitude de DAP. A análise dos parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 15, mostram valores de IA

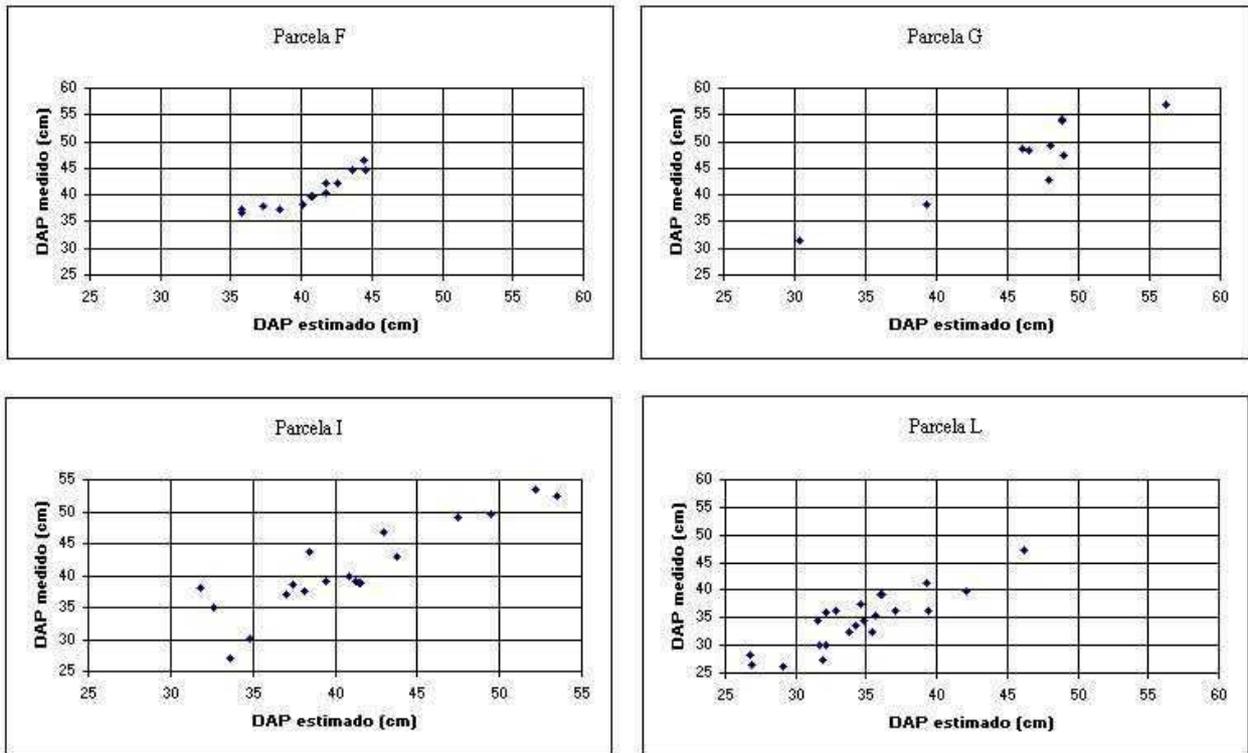
superiores a 0,77 para todas as parcelas, exceto B e C que apresentaram IA igual a 0,43. O erro padrão da estimativa foi inferior a 10% para todas as parcelas, exceto para a parcela E, que apresentou erro igual a 12,53%.

As Parcelas B e C apresentaram valores baixos para o  $R^2_{aj}$  e IA, entretanto o erro ficou abaixo de 10%. Isso ocorreu em função dos valores estimados estarem muito próximos dos valores médios, dada a pequena variabilidade na amplitude dos valores de DAP, como pode ser observado graficamente na Figura 28. Para que se possa garantir a eficiência do modelo ajustado para este estrato, deveriam ser coletados dados abrangendo mais classes de DAP.

A Figura 29 apresenta as relações entre o DAP medido em campo com o DAP estimado para cada parcela, pela equação de regressão ajustada.

FIGURA 29 - DAP ESTIMADO X DAP MEDIDO





A análise dos valores estimados contra os valores reais (Figura 29) indica que os modelos propostos explicam com eficiência a variável DAP, sendo possível a utilização destes modelos para estimar DAP em função das variáveis dendrométricas extraídas a partir dos dados LIDAR.

### 7.6.2 Estimativa do volume através dos dados LIDAR

Para a estimativa do volume individual foram utilizados os modelos clássicos da engenharia florestal: Modelo de *Schumacher* (13), Modelo de *Spurr* (14) e Modelo de *Husch* (15).

$$v = b_0 \cdot d^{b_1} \cdot h^{b_2} \quad (13)$$

$$v = b_0 + b_1 \cdot (d^2 \cdot h) \quad (14)$$

$$v = b_0 \cdot d^{b_1} \quad (15)$$

Sendo:

$v$  = Volume estimado através das equações ajustadas no Inventário Florestal;

$d$  = DAP estimado através das equações definidas na Tabela 15 (item 7.4.1);

$h$  = Altura obtida através dos dados LIDAR.

As equações preditivas foram ajustadas através do Método dos Mínimos Quadrados pelo qual definiu-se a curva de regressão linearmente, utilizando o *software* Statgraphics. Os coeficientes de regressão estão relacionados na Tabela 16. A análise estatística dos modelos está apresentada na Tabela 17.

TABELA 16 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA OS MODELOS DE VOLUME ESTIMADO PELOS DADOS LIDAR

Parcela	MODELOS AJUSTADOS					
	Schumacher		Spurr		Husch	
A	Constante (b0)	-11,1126	Constante (b0)	-0,3724	Constante (b0)	-8,1068
	ln DAP'	2,3164	DAP' ^2 *	0,00005	ln DAP'	2,3893
	Ln HLaser	0,9558	HLaser			
B e C	Constante (b0)	-7,9287	Constante (b0)	0,13294	Constante (b0)	-8,3471
	ln DAP'	2,6554	DAP' ^2 *	0,00004	ln DAP'	2,4858
	Ln HLaser	-0,2950	HLaser			
D	Constante (b0)	-11,1307	Constante (b0)	-0,1890	Constante (b0)	6,7084
	ln DAP'	2,0757	DAP' ^2 *	0,00004	ln DAP'	1,9807
	Ln HLaser	1,2113	HLaser			
E	Constante (b0)	-14,9040	Constante (b0)	-0,1221	Constante (b0)	-7,0705
	ln DAP'	1,4995	DAP' ^2 *	0,00004	ln DAP'	2,1183
	Ln HLaser	2,9276	HLaser			
F	Constante (b0)	-10,7351	Constante (b0)	-0,0214	Constante (b0)	-6,6129
	ln DAP'	1,7764	DAP' ^2 *	0,00004	ln DAP'	1,9993
	Ln HLaser	1,4168	HLaser			
G	Constante (b0)	-7,1740	Constante (b0)	-0,0491	Constante (b0)	-7,6897
	ln DAP'	2,3107	DAP' ^2 *	0,00004	ln DAP'	2,2738
	Ln HLaser	-0,1946	HLaser			
I	Constante (b0)	-10,3623	Constante (b0)	-0,0840	Constante (b0)	-6,7510
	ln DAP'	2,0849	DAP' ^2 *	0,00004	ln DAP'	2,0294
	Ln HLaser	0,9850	HLaser			
L	Constante (b0)	-9,7872	Constante (b0)	-0,1140	Constante (b0)	-8,6455
	ln DAP'	2,4066	DAP' ^2 *	0,00004	ln DAP'	2,5487
	Ln HLaser	0,4818	HLaser			

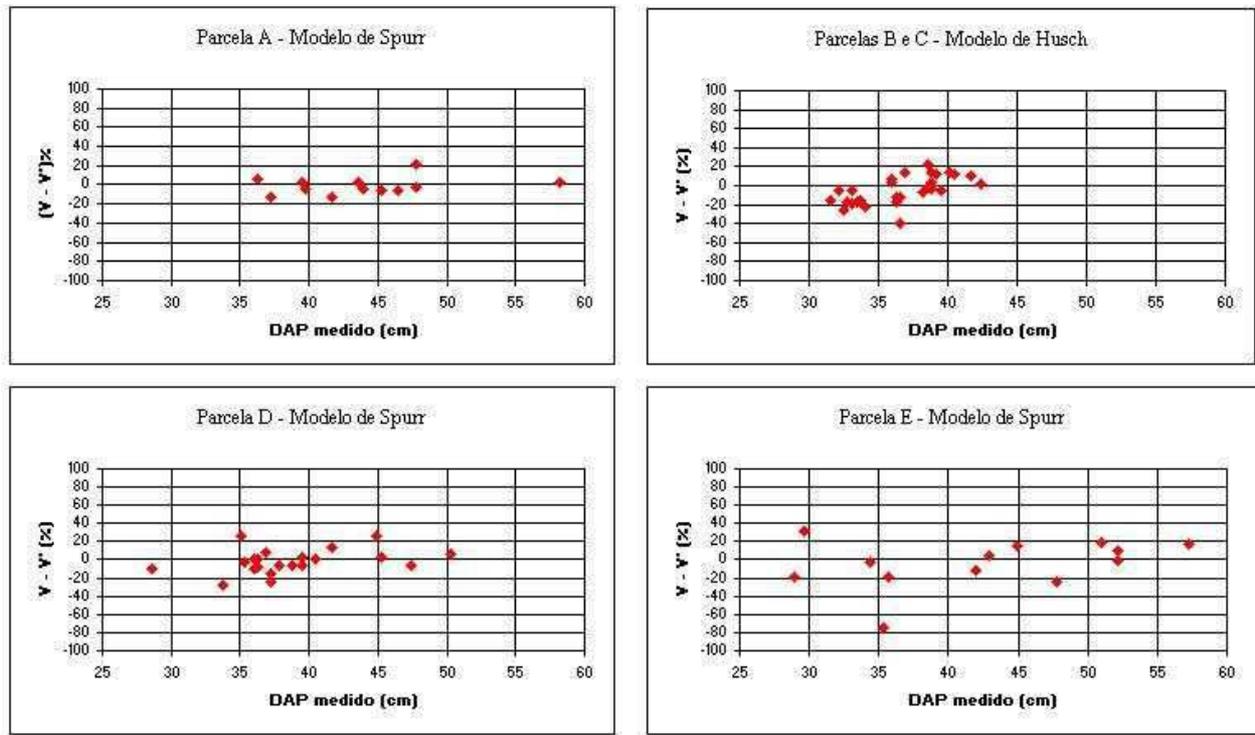
TABELA 17 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS MODELOS DE VOLUME

Parcela	MODELOS AJUSTADOS								
	Schumacher			Spurr			Husch		
	R <sup>2</sup> aj	IA	Syx %	R <sup>2</sup> aj	IA	Syx %	R <sup>2</sup> aj	IA	Syx %
A	0,88	0,90	10,97	<b>0,90</b>	<b>0,91</b>	<b>9,95</b>	0,89	0,90	11,03
B e C	0,48	0,52	13,95	0,50	0,51	13,78	<b>0,50</b>	<b>0,52</b>	<b>13,69</b>
D	0,73	0,76	14,65	<b>0,75</b>	<b>0,76</b>	<b>14,16</b>	0,65	0,66	16,87
E	0,71	0,58	32,75	<b>0,74</b>	<b>0,76</b>	<b>23,28</b>	0,72	0,58	31,05
F	0,71	0,76	9,56	<b>0,75</b>	<b>0,78</b>	<b>8,88</b>	0,69	0,72	9,90
G	0,81	0,58	21,46	<b>0,76</b>	<b>0,66</b>	<b>18,20</b>	0,73	0,62	22,61
I	0,82	0,84	14,53	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>	<b>13,40</b>	0,76	0,77	16,73
L	0,77	0,79	17,84	<b>0,79</b>	<b>0,80</b>	<b>17,00</b>	0,78	0,79	17,40

Os modelos ajustados para o volume apresentaram, em sua maioria, valores altos para R<sup>2</sup>aj e IA, exceto as parcelas B e C. O erro padrão da estimativa percentual variou de 9,95% a 23,28%, sendo o maior valor do erro identificado na parcela E. Esta parcela, por sua vez, encontra-se em área densamente povoada, o que dificultou a identificação das árvores e certamente contribuiu para o incremento do erro, tanto nas estimativas de DAP quanto de volume.

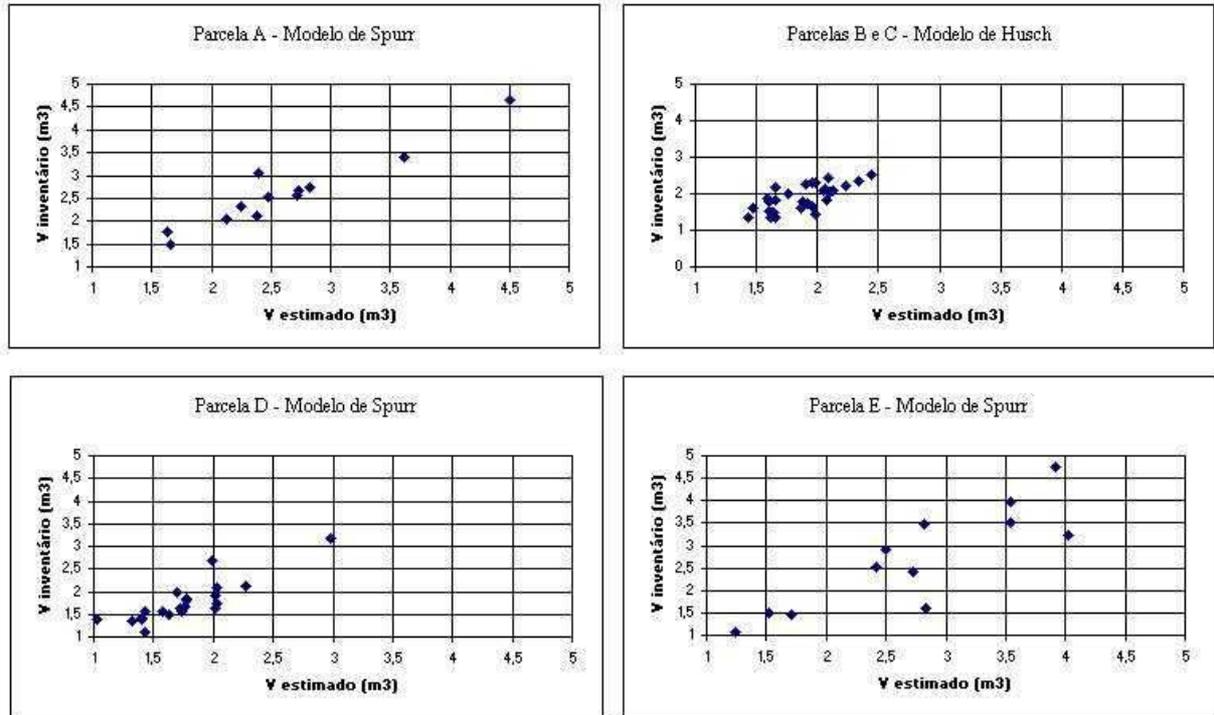
A Figura 30 apresenta a análise de distribuição dos resíduos de regressão para os modelos de volume que se mostraram mais eficientes, para cada parcela.

FIGURA 30 - ANÁLISE DE RESÍDUOS DE REGRESSÃO – VOLUME LIDAR



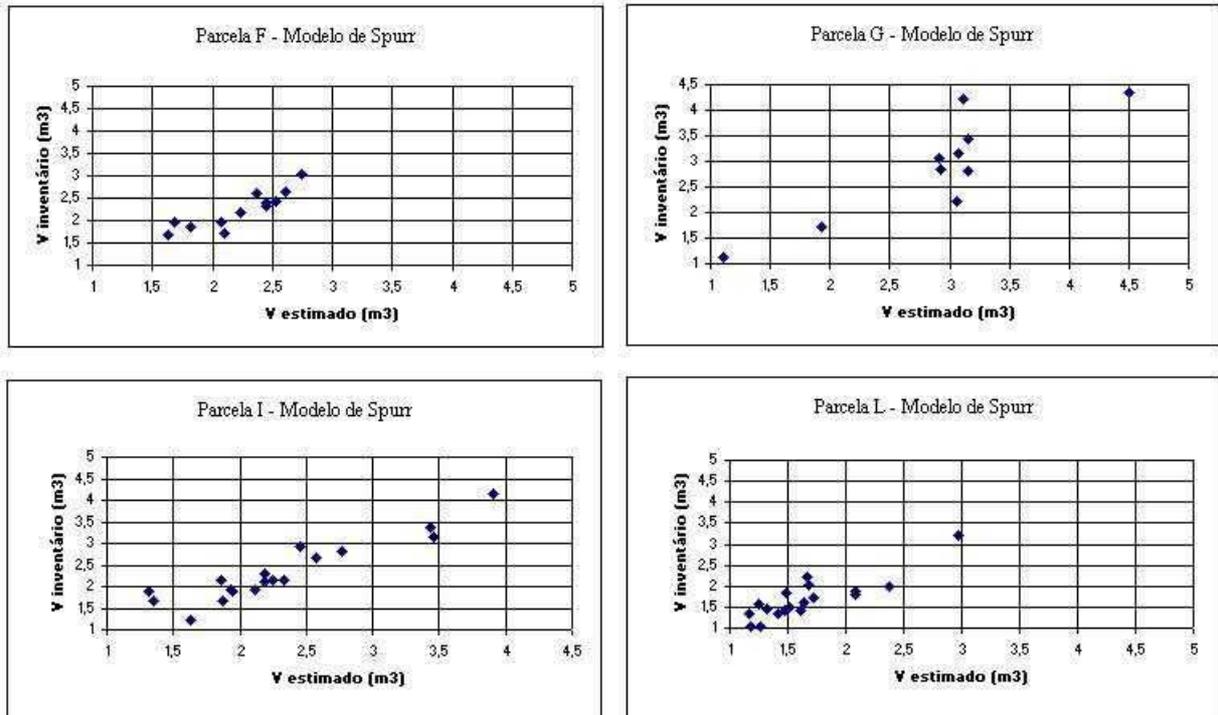
Nas Figuras 31 e 32 pode-se observar o relacionamento entre o volume calculado pelo Inventário Florestal e o Volume estimado através dos dados LIDAR para aqueles modelos que se apresentaram mais eficientes.

FIGURA 31 - VOLUME INVENTÁRIO X VOLUME LIDAR – PARCELAS A a E



É possível observar através dos gráficos apresentados na Figura 31, uma maior dispersão dos resíduos para as parcelas “E” e “G”, justamente nas parcelas onde foram identificados os maiores valores do erro padrão da estimativa. Na parcela “G” foram identificadas 100% das árvores, porém por se tratar de uma parcela pouco densa, a amostragem pode não ter sido suficiente, fato este, que pode ter contribuído para o alto valor do erro.

FIGURA 32 - VOLUME INVENTÁRIO X VOLUME LIDAR – PARCELAS F a L



O povoamento em estudo abrange diferentes espécies em idades avançadas (cerca de 40 anos), com vários desbastes realizados e sem linhas de plantios bem definidas. Percebeu-se também a existência de diferentes tipos de solo, fator que certamente influencia o crescimento. Em geral, algumas relações dendrométricas são prejudicadas nestas condições, como por exemplo, a relação hispométrica.

Quando se avaliou a possibilidade de utilização de uma única equação preditiva para toda a área de estudo, verificou-se a presença de observações discrepantes (*outliers*). A presença de *outliers* pode ser atribuída a diferentes fatores:

- i. Heterogeneidade da área de estudo, sobretudo com relação as espécies diferentes, de difícil identificação por meio de fotografias aéreas ou dados LIDAR;
- ii. Povoamento que já sofreu vários desbastes;
- iii. Condições diferentes de sítio;
- iv. Poucas amostras para classes de diâmetros menores que 30 cm, função da idade do povoamento.

Outro fator relevante a ser considerado na análise da eficiência dos modelos gerados a partir das variáveis extraídas dos dados LIDAR, é a questão da densidade amostral. No caso do Inventário Florestal (SANQUETTA, 2004) foram utilizadas 34 parcelas, enquanto este estudo baseou-se em 9 unidades amostrais, para a mesma área, com resultados bastante próximos.

## 8 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no item 7.3 demonstram que é possível a identificação de árvores individuais com alta precisão, sobretudo as árvores que se encontram no dossel superior (dominantes e co-dominantes), onde o acerto médio incluindo todas as árvores foi de 82,8%. Observou-se também que o fator densidade do povoamento interfere na eficiência do algoritmo, fato este já observado em outros trabalhos relatados na revisão de literatura.

Dada a grande densidade de pontos LIDAR adquirida, em média foram obtidos 6,51 pontos /m<sup>2</sup>, pôde-se observar um alto percentual de retornos da superfície do terreno, fato este que garantiu, mesmo em áreas densamente povoadas, a identificação de árvores individuais de modo eficiente. Pôde-se perceber que o número de pontos considerados como pertencentes ao terreno é fortemente influenciado pelo algoritmo utilizado para realizar esta classificação. Não foi objeto deste trabalho a avaliação de algoritmos para classificação dos dados LIDAR, mas pode ser considerada como uma fonte de erro relevante e interfere diretamente na modelagem dos parâmetros dendrométricos.

Os resultados apresentados no item 7.6.1 indicaram um bom ajuste da variável DAP em função da área de copa e altura, para os modelos definidos por estrato florestal. O erro padrão da estimativa percentual mínimo encontrado foi de 3,44 % para a Parcela “F” e 12,53 % para a Parcela “E”. Os resíduos de regressão apresentaram-se bem distribuídos e sem tendenciosidade.

A análise estatística dos modelos apresenta valores de R<sup>2</sup>aj máximo de 0,904 para a Parcela “A” e mínimo de 0,501 para as Parcelas “B e C”. O erro padrão da estimativa variou de 8,88 % para a Parcela “F” a 23,28 % para a Parcela “E”. Seria válida a realização de uma análise mais criteriosa nas parcelas onde o ajuste não foi satisfatório, buscando um melhor entendimento a respeito das fontes prováveis de erros, com novas medições em campo e cubagem das árvores.

Este estudo, embora inicial, mostrou a viabilidade técnica da utilização da tecnologia LIDAR para estimativa de variáveis dendrométricas. Os resultados preliminares são promissores, no entanto, novos estudos devem ser incentivados para o aprimoramento da metodologia.

## 9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade da pesquisa, sugere-se o estudo de outros algoritmos para extração das variáveis dendrométricas a partir dos dados LIDAR e validação da metodologia para outra área de estudo.

Vale ressaltar também a importância de se estudar outros métodos para classificação dos dados LIDAR e avaliar como a densidade de retornos interfere na modelagem dos parâmetros dendrométricos. Outras características como altura de vôo e ângulo de abertura do sensor devem ser consideradas.

Um dos requisitos do setor florestal é a aplicabilidade da tecnologia para plantios florestais, principalmente em áreas densamente povoadas. Espera-se que em áreas com linhas de plantios bem definidas, os resultados possam ser ainda mais eficazes.

Sugere-se uma avaliação econômica do uso da tecnologia para o setor florestal e sua operacionalidade. Neste estudo poderia ser contemplada a análise de condições ótimas de vôo, que apresentem melhor relação custo benefício.

O processo para delimitação automática das copas mostrou-se acurado, porém requer estudos de otimização, pois o gasto computacional é elevado. Outros métodos de segmentação de imagens podem ser avaliados para este propósito.

Seria de grande relevância o estudo da tecnologia para outras aplicações como: planejamento de estradas florestais para escoamento da produção e colheita, uso integrado dos dados LIDAR com imagens ópticas para monitoramento da vegetação, controle de pragas e doenças.

## BIBLIOGRAFIA

- van AARDT J. A. N., WYNNE R. H. **A Multi-resolution approach to Forest Segmentation as a Precursor to Estimation of Volume and Biomass by Species** ASPRS 2004, p. 241, Blacksburg, VA, 2006.
- ANDERSEN, H.; REUTEBUCH, S. E.; SCHREUDER, G. F. **Automated Individual Tree Measurement Through Morphological Analysis of a LiDAR-Based Canopy Surface Model.** Proceedings of the First International Precision Cooperative Symposium, Washington, 2001.
- BALTASAVIAS, E. P. **Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 54, p. 164-198, 1999a.
- BALTASAVIAS, E. P. **Airborne laser scanning: basic relations and formulas.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 54(2-3) p. 199-214, 1999b.
- BENOÎT, A. et al. **Measuring Forest Canopy height using a combination of Lidar and aerial photography data.** IAPRS, Vol. XXXIV, Annapolis, 2001.
- BRANDTBERG, T., **Algorithms for structure- and contour-based tree species classification using digital image analysis.** Em HILL D. A., LECKIE, D. G. (Eds.), Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery of Forestry, p. 199-207, Victoria, BC, 1998.
- BROWN, S. **Measuring carbon in forests: current and future challenges.** Environmental Pollution, v. 116, p. 363-372, 2001.
- DRAKE, J. B. et al. **Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LiDAR.** Remote Sensing of Environment, v. 79, p. 305-319, 2002.
- DRAKE, J.B. et al. **Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships.** Global Ecology & Biogeography, v. 12, p. 147-159, 2003.
- DUBAYAH, R.O. e DRAKE, J.B. **LiDAR remote sensing for forestry** Journal of Forestry, v. 98 (6), p. 44-46, 2000.
- FELIX, D. et al. **Estimativa de biomassa florestal utilizando dados do mapeamento digital a Laser.** Curitiba, 2003. Relatório Técnico, CEHPAR.
- FLOOD M., GUTELIUS B. **Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airbourne laser radar.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 63, p. 327-329 e 363-366, 1997.
- FRIEDLAENDER, H., KOCH, B. **First experience in the application of laser scanner data for the assessment of vertical and horizontal forest structures,** IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.

- GOUGEON, F. **Automatic individual tree crown delineation using a valley-following algorithm and a rule-based system.** Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Pacific Forestry Centre, Victoria B.C., 1998.
- HAUGERUT, R. A.; HARDING, D. J. **Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LiDAR topographic survey data.** International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 53, p. 193-203, 2001.
- HYPPIA, J. e INKINEN, M. **Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner.** Photogramm. J. Finland, v. 16, p. 27–42, 1999.
- KINI, A., POPESCU, S.C., **TreeVaW: a versatile tool for analyzing forest canopy LIDAR data: A preview with an eye towards future.** CD-ROM Proceedings, ASPRS 2004 Fall Conference, Kansas City , Missouri , Sept. 12-16, 2004.
- LARSEN, M. **Finding an optional match window for spruce top detection based on an optical tree model.** Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Pacific Forestry Centre, Victoria, B. C., 1998.
- LECKIE, D.L. et al. **Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis.** Canadian Journal of Remote Sensing, v. 29, p. 633–649, 2003.
- LEFSKY, M. A. et al. **LiDAR remote sensing for the ecosystem studies.** Bioscience, v. 52, p. 19-30, 2002.
- LEFSKY, M. A. et al. **Surface LIDAR remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA,** Remote Sensing of Environment, New York, v. 67, p. 83-98, 1999a.
- LEFSKY, M. A. et al. **LiDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forest.** Remote Sensing of Environment, v. 70, p. 339-361, 1999b.
- MACHADO, S. A., FIGUEIREDO FILHO, A., **Dendometria.** Curitiba: A. Figueiredo Filho, 2003.
- MAGNUSSEN, S.; BOUDEWYN, P. **Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators.** Canadian Journal of Forest Research, v. 28, p. 1016-1031, 1998.
- MAGNUSSEN, S.; EGGERMONT, P.; LARICCIA, V. N. **Recovering tree heights from airborne laser scanner data.** Forest Science, v. 45(3), p. 407-422, 1999.
- MALTAMO M. et al., **Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics,** Forestry, v. 79 (2), 2006.
- MARTINS, M. A. R., **Soluções de engenharia com informações georreferenciadas obtidas via tecnologia laser, relatório de aquisição de dados.** Curitiba, 2002. Relatório Técnico, CEHPAR.

- MEANS, J. E. et al. **Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LiDAR.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 66, p. 1367-1372, 2000.
- MEANS, J. E. et al. **Use of large-footprint scanning airborne LiDAR to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon.** Remote Sensing of Environment, v. 67, p. 298-308, 1999.
- MILLER, C.L., LAFLAMME, R.A. **The digital terrain model** Engineer. and Remote Sensing, v. 24, p. 433-442, 1958.
- NAESSET, E. **Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 52, p. 49-56, 1997a.
- NAESSET, E. **Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data,** Remote Sensing of Environment, v. 61, p. 246-253, 1997b.
- NAESSET, E. **Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data.** Remote Sensing Environ. v. 80, p. 88–99, 2002.
- NAESSET, E., BJERKNES, K. O. **Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data.** Remote Sensing of Environment, v. 78, p. 328–340, 2001.
- NAESSET, E., OKLAND, T. **Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve.** Remote Sensing of Environment, v. 79, p. 105–115., 2002.
- NELSON, R.; KRABILL, W.; TONELLI, J. **Estimating Forest Biomass and Volume Using Airborne Laser Data.** Remote Sensing of the Environment, v. 24, p. 247-267, 1988.
- NILSSON, M. **Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system.** Remote Sensing of Environment, v. 56, p. 1-7, 1996.
- PATENAUDE, G. et al. **Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing,** Remote Sensing of Environment, New York, v. 93, p. 368-380, 2004.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J; SÖDERMAN, U. **Detecting and measuring individual tree using an airborne laser scanner.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 68, p. 925-932, 2002.
- PETRIE, G. et al. **Terrain modelling in surveying and civil engineering.** Londres: Editora Whittles, 1990.
- POLLOCK, R. **Individual tree recognition based on a synthetic tree crown image model.** Em HILL, D. A.; LECKIE, D. G., Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, pp. 25-34, 1998.
- POPESCU, S. C. **Estimating Plot-Level Forest Biophysical Parameters Using Small-Footprint Airborne Lidar Measurements.** Blacksburg, Virginia, 115f. Tese (Doutorado em Floresta) -

Departement of Forestry, Virginia Tech, 2002.

POULIOT, D. A. et al., **Automated tree crown detection in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration.** Remote Sensing of Environment, v. 82, p. 322-334, 2002.

**Realm Survey Suite – Data Processing Manual**, Outubro 2002.

REUTEBUCH, S. E. et al. **Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy** Canadian Journal Remote Sensing, v. 29(5), p. 527-535, 2003.

RIÃNO, D. et al. **Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (LiDAR) in two contrasting forests.** Agricultural and Forest Meteorology, v. 124, p. 269-275, 2004.

SANQUETA, C. R., **Inventário Florestal de Povoamento de Pinus sp. na Região de Pinhais-PR**, Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004, Relatório técnico UFPR.

SCHREIRER, H. et al. **Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared system.** Int. J. Remote Sens, v. 6, p. 101-103, 1985.

SPENCER B. GROSS INC., **Final Report: Can Small-footprint LIDAR Be Used to Predict Individual Tree Characteristics ?**, Mississippi, 1999, Relatório Técnico.

TIEDE, D., HOCHLEITNER, G., BLASCHKE, T. **A Full GIS-Based Workflow for Tree Identification and Tree Crown Delineation Using Laser Scanning** Stilla U, Rottensteiner F, Hinz S (Eds) CMRT05. IAPRS, v. XXXVI (3/W24), Vienna, Austria, 2005.

WEHR, A., LOHR, U. **Airborne Laser Scanning: an introduction and overview.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 54 (2-3), p. 68-82, 1999.

YOUNG, B., EVANS D. L., and PARKER R. C. **Methods for comparison of LIDAR and field measurements of loblolly pine.** Proceedings: Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, p. 10-12 January 2000.

**ANEXO I - PLANILHA COM OS DADOS DE CAMPO**

---

Parcela	Arvore	Altura (m)	CAP_m	DAP_cm
A	1,00	35,00	1,83	58,25
A	2,00	34,00	1,33	42,34
A	3,00	36,00	1,29	41,06
A	4,00	38,00	1,08	34,38
A	5,00	30,00	0,92	29,28
A	6,00	38,00	1,24	39,47
A	7,00	34,00	1,50	47,75
A	8,00	34,00	1,37	43,61
A	9,00	27,00	1,17	37,24
A	10,00	33,00	1,25	39,79
A	11,00	34,00	1,14	36,29
A	12,00	32,00	1,42	45,20
A	13,00	30,00	1,50	47,75
A	14,00	40,00	1,46	46,47
A	15,00	31,00	1,31	41,70
A	16,00	36,00	1,38	43,93
B	1,00	34,00	1,31	41,70
B	2,00	35,00	1,30	41,38
B	3,00	32,00	1,04	33,10
B	4,00	36,00	1,13	35,97
B	5,00	32,00	1,26	40,11
B	6,00	38,00	0,99	31,51
B	7,00	35,00	1,30	41,38
B	8,00	36,00	1,22	38,83
B	9,00	32,00	0,50	15,92
B	10,00	36,00	1,24	39,47
B	11,00	31,00	0,83	26,42
B	12,00	35,00	1,22	38,83
B	13,00	36,00	1,06	33,74
B	14,00	30,00	0,98	31,19
B	15,00	35,00	1,04	33,10

---

---

B	16,00	32,00	1,03	32,79
B	17,00	32,00	1,13	35,97
B	18,00	33,00	1,01	32,15
B	19,00	35,00	1,14	36,29
B	20,00	36,00	1,07	34,06
B	21,00	35,00	1,16	36,92
C	1,00	27,00	1,15	36,61
C	2,00	35,00	1,13	35,97
C	3,00	37,00	1,40	44,56
C	4,00	40,00	1,21	38,52
C	5,00	36,00	1,20	38,20
C	6,00	37,00	1,21	38,52
C	7,00	36,00	1,32	42,02
C	8,00	36,00	1,33	42,34
C	9,00	34,00	1,05	33,42
C	10,00	34,00	1,14	36,29
C	11,00	36,00	1,25	39,79
C	12,00	35,00	1,22	38,83
C	13,00	38,00	1,22	38,83
C	14,00	38,00	1,27	40,43
C	15,00	34,00	1,15	36,61
C	16,00	33,00	1,02	32,47
C	17,00	38,00	1,23	39,15
C	18,00	41,00	1,09	34,70
D	1,00	28,00	1,26	40,11
D	2,00	22,00	1,55	49,34
D	3,00	23,00	1,14	36,29
D	4,00	26,00	1,14	36,29
D	5,00	22,00	1,06	33,74
D	6,00	28,00	1,13	35,97
D	7,00	32,00	1,58	50,29
D	8,00	30,00	1,17	37,24
D	9,00	30,00	0,84	26,74

---

---

D	10,00	25,00	1,06	33,74
D	11,00	31,00	1,24	39,47
D	12,00	29,00	1,10	35,01
D	13,00	28,00	1,22	38,83
D	14,00	28,00	1,11	35,33
D	15,00	29,00	1,16	36,92
D	16,00	34,00	1,41	44,88
D	17,00	29,00	1,14	36,29
D	18,00	31,00	1,13	35,97
D	19,00	30,00	1,24	39,47
D	20,00	29,00	0,90	28,65
D	21,00	26,00	1,42	45,20
D	22,00	28,00	1,27	40,43
D	23,00	24,00	1,49	47,43
D	24,00	29,00	1,31	41,70
D	25,00	32,00	1,17	37,24
D	26,00	29,00	1,19	37,88
E	1,00	33,00	1,64	52,20
E	2,00	33,00	1,11	35,33
E	3,00	37,00	1,64	52,20
E	4,00	35,00	1,32	42,02
E	5,00	32,00	1,08	34,38
E	6,00	35,00	0,82	26,10
E	7,00	37,00	1,80	57,30
E	8,00	38,00	1,17	37,24
E	9,00	21,00	0,87	27,69
E	10,00	36,00	1,50	47,75
E	11,00	31,00	1,43	45,52
E	12,00	34,00	1,60	50,93
E	13,00	24,00	1,75	55,70
E	14,00	23,00	1,07	34,06
E	15,00	32,00	0,93	29,60
E	16,00	34,00	1,90	60,48

---

---

E	17,00	35,00	1,35	42,97
E	18,00	29,00	1,12	35,65
E	19,00	37,00	1,41	44,88
E	20,00	32,00	0,91	28,97
F	1,00	36,00	1,46	46,47
F	2,00	35,00	1,25	39,79
F	3,00	32,00	1,15	36,61
F	4,00	34,00	1,40	44,56
F	5,00	36,00	1,17	37,24
F	6,00	36,00	1,17	37,24
F	7,00	35,00	1,05	33,42
F	8,00	31,00	1,40	44,56
F	9,00	35,00	1,25	39,79
F	10,00	35,00	1,49	47,43
F	11,00	36,00	1,27	40,43
F	12,00	30,00	1,20	38,20
F	13,00	30,00	0,78	24,83
F	14,00	32,00	1,10	35,01
F	15,00	34,00	1,33	42,34
G	1,00	31,00	1,52	48,38
G	2,00	33,00	1,53	48,70
G	3,00	34,00	1,79	56,98
G	4,00	30,00	1,70	54,11
G	5,00	33,00	1,55	49,34
G	6,00	37,00	1,69	53,79
G	7,00	29,00	0,99	31,51
G	8,00	30,00	1,20	38,20
G	9,00	31,00	1,34	42,65
G	10,00	32,00	1,49	47,43
I	1,00	33,00	1,20	38,20
I	2,00	31,00	0,79	25,15
I	3,00	35,00	1,56	49,66
I	4,00	34,00	1,18	37,56

---

---

I	5,00	34,00	0,95	30,24
I	6,00	31,00	1,16	36,92
I	7,00	32,00	1,23	39,15
I	8,00	31,00	1,07	34,06
I	9,00	31,00	0,85	27,06
I	10,00	35,00	1,10	35,01
I	11,00	29,00	0,90	28,65
I	12,00	37,00	1,35	42,97
I	13,00	32,00	0,79	25,15
I	14,00	36,00	1,22	38,83
I	15,00	35,00	1,23	39,15
I	16,00	32,00	1,25	39,79
I	17,00	37,00	1,21	38,52
I	18,00	26,00	1,45	46,15
I	19,00	25,00	0,76	24,19
I	20,00	30,00	1,54	49,02
I	21,00	36,00	1,22	38,83
I	22,00	28,00	1,04	33,10
I	23,00	29,00	1,65	52,52
I	24,00	27,00	1,30	41,38
I	25,00	34,00	1,47	46,79
I	26,00	30,00	1,80	57,30
I	27,00	26,00	1,41	44,88
I	28,00	26,00	1,37	43,61
I	29,00	26,00	1,29	41,06
I	30,00	28,00	1,20	38,20
I	31,00	37,00	1,68	53,48
I	32,00	37,00	1,25	39,79
L	1,00	29,00	1,20	38,20
L	2,00	26,00	0,71	22,60
L	3,00	32,00	1,06	33,74
L	4,00	24,00	0,83	26,42
L	5,00	28,00	1,14	36,29

---

---

L	6,00	30,00	0,94	29,92
L	7,00	34,00	1,02	32,47
L	8,00	35,00	1,14	36,29
L	9,00	29,00	0,86	27,37
L	10,00	32,00	1,08	34,38
L	11,00	34,00	1,23	39,15
L	12,00	28,00	1,30	41,38
L	13,00	29,00	1,08	34,38
L	14,00	30,00	1,46	46,47
L	15,00	29,00	0,94	29,92
L	16,00	33,00	1,14	36,29
L	17,00	28,00	0,89	28,33
L	18,00	37,00	1,48	47,11
L	19,00	32,00	1,02	32,47
L	20,00	37,00	1,23	39,15
L	21,00	31,00	1,13	35,97
L	22,00	33,00	1,18	37,56
L	23,00	32,00	1,25	39,79
L	24,00	32,00	0,82	26,10
L	25,00	33,00	1,11	35,33
L	26,00	30,00	0,98	31,19
L	27,00	34,00	1,21	38,52

---