

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAURICIO MÜLLER

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DE VOO
PARA AQUISIÇÃO DE DADOS LIDAR NA QUALIDADE DAS VARIÁVEIS
FLORESTAIS EXTRAÍDAS EM FLORESTAS PLANTADAS**

CURITIBA

2013

MAURICIO MÜLLER

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DE VOO
PARA AQUISIÇÃO DE DADOS LIDAR NA QUALIDADE DAS VARIÁVEIS
FLORESTAIS EXTRAÍDAS EM FLORESTAS PLANTADAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Nelson Y. Nakajima
Co-orientadores: Prof^a Dra. Ana Paula B. Kersting
Prof. Dr. Roberto T. Hosokawa
Prof. Dr. Nelson C. Rosot

CURITIBA

2013

Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR

Müller, Mauricio

Avaliação da influência da configuração de voo para aquisição de dados LIDAR na qualidade das variáveis florestais extraídas em florestas plantadas / Mauricio Müller. – 2013

177 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Y. Nakajima

Coorientadores: Prof^a Dr^a. Ana Paula B. Kersting ; Prof. Dr. Roberto T. Hosokawa; Prof. Dr. Nelson C. Rosot

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 29/08/2013.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Mapeamento florestal. 2. Radar ótico. 3. Levantamentos florestais. 4. Sensoriamento remoto. 5. Teses. I. Nakajima, Nelson Yoshihiro. II. Kersting, Ana Paula Baungarten. III. Hosokawa, Roberto Tuyoshi. IV. Rosot, Nelson Carlos. V. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. VI. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.58

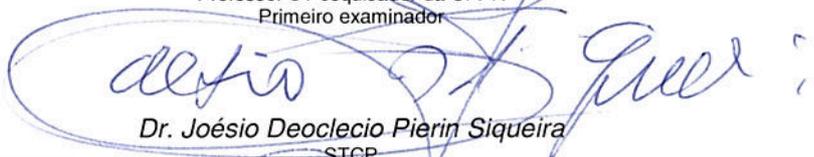


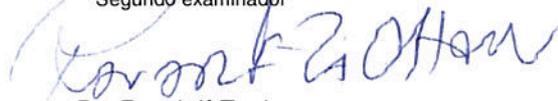
Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da
Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

PARECER
Defesa nº. 992

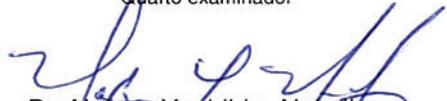
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o(a) doutorando(a) *Maurício Müller* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DE VOO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS LIDAR NA QUALIDADE DAS VARIÁVEIS FLORESTAIS EXTRAÍDAS EM FLORESTAS PLANTADAS**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.


Dr. Edson Aparecido Mitshita
Professor e Pesquisador da UFPR
Primeiro examinador

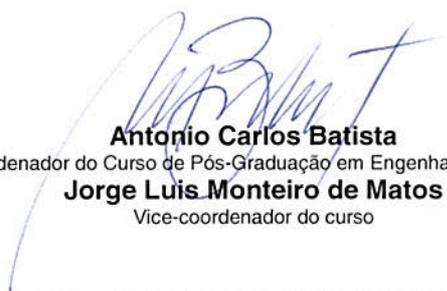

Dr. Joésio Deoclecio Pierin Siqueira
STCP
Segundo examinador


Dr. Randolph Zachow
Serviço Florestal Brasileiro
Terceiro examinador


Dr. Ana Paula Baungarten Kersting
LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvi
Quarto examinador


Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 29 de agosto de 2013.


Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Jorge Luis Monteiro de Matos
Vice-coordenador do curso

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram no desenvolvimento desta tese, em especial:

Ao professor Nelson Nakajima pela orientação, paciência, persistência e ensinamentos transmitidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À co-orientadora Dra. Ana Paula Baungarten Kersting pela amizade, dedicação, paciência, conhecimento e orientação segura, fatos esses que possibilitaram a conclusão desse trabalho.

Aos professores Roberto Hosokawa e Nelson Rosot, também co-orientadores desse trabalho, pelo apoio e experiência transmitida.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC pela oportunidade da realização do curso.

À todos os colegas e amigos do LACTEC, pelo apoio e paciência durante a elaboração desta tese.

À KLABIN S/A pelo fornecimento dos dados de campo e de inventário florestal.

À FINEP através do convênio 21.01.0602.00 e a REDE PERLA, pelo apoio na coleta dos dados LIDAR.

Ao CNPq pelos subsídios para a importação, constantes da Lei 8010/90, LI 12/1885224-5; 12/1064273-7; 12/1846474-1; 12/1846472-5; 02/1005024-9.

À DEUS por tudo.

*“Não sabendo que era
impossível, foi lá e fez!”*

Jean Cocteau

RESUMO

Nas últimas décadas, vários estudos têm sido realizados visando à utilização dos dados obtidos através da tecnologia LIDAR na obtenção de variáveis florestais. Embora os estudos indiquem alto potencial do LIDAR para aplicações florestais, o elevado custo associado dificulta a operacionalização da tecnologia no meio florestal. O custo de um levantamento LIDAR, como em outros tipos de levantamentos, é composto de custos fixos e variáveis. A parcela de custos variáveis, a qual pode ser otimizada, encontra-se associada, dentre outros fatores, ao número de horas de voo. O tempo de voo depende principalmente da configuração de voo utilizada no levantamento. Em trabalhos no Brasil, sempre uma mesma configuração de voo (altura e ângulo de varredura) tem sido adotada, a qual resulta em uma alta densidade de pontos. Este trabalho tem por objetivo analisar o impacto da utilização de diferentes parâmetros operacionais para diferentes espécies de florestas plantadas (*Pinus* e *Eucalyptus*), visando prover insumos para uma adequada análise custo-benefício. Para tanto é necessário avaliar a qualidade dos resultados obtidos para cada configuração adotada. Com esse intuito foram utilizadas duas abordagens para a obtenção de variáveis florestais a partir dos dados do LIDAR, denominadas neste trabalho de Abordagem em Nível de Parcela Amostral e Abordagem em Nível de Árvore Individual. Na Abordagem em Nível de Parcela Amostral, busca-se investigar se a utilização de determinada configuração conduz a um modelo no qual as variáveis independentes (dados extraídos do LIDAR) melhor expliquem a variável dependente (variável florestal) de interesse, isto é, que resultem em modelo com melhor qualidade de ajuste. Na Abordagem em Nível de Árvore Individual as diferentes configurações são avaliadas em termos do número de árvores automaticamente identificadas, altura individual e volume, tendo como referência os dados do inventário florestal. Os resultados experimentais demonstraram que na Abordagem em Nível de Parcela Amostral pode haver significativa variação na qualidade de ajuste dependendo da configuração utilizada e espécie investigada. Na Abordagem em Nível de Árvore Individual, os resultados demonstraram de uma maneira geral, que configurações que resultem em maior densidade de pontos conduzem a melhor desempenho. Os resultados também indicaram que para uma dada densidade de pontos deve-se dar preferência à configuração que utilize uma menor altura de voo

Palavras-Chave: LIDAR, Sensoriamento Remoto, Florestas Plantadas, Variáveis Florestais, Parâmetros Operacionais.

ABSTRACT

In the last decades, several studies have been conducted aiming at the extraction of forest variables from LIDAR data. Although such studies have indicated great potential, the high cost associated with the LIDAR data acquisition process inhibits the technology to become an operational technique for forestry applications. The cost of a LIDAR survey, as for any other data collection technique, is composed of fixed and variable costs. The variable portion, which can be optimized, is dependent, among other factors, on the number of flight hours. The flight time is mainly dependent on the flight configuration used for the survey. The research studies developed in Brasil have been always conducted using a same flight configuration (flying height and scan angle), which leads to a high density of points. The objective of this research work is to investigate the impact of using different operational parameters on different species of planted forests (*Pinus e Eucalyptus*), aiming at providing inputs for an adequate cost-benefit analysis. More specifically, the quality of the extracted forest variables from the LIDAR data collected using the different flight configurations is evaluated. For that purpose, two approaches are used, which are denoted in this research work as Area-Based Approach and Single-Tree Approach. In the Area-Based Approach, it is investigated whether the utilization of a particular flight configuration would lead to a model where the independent variables (data extracted from LIDAR data) better explain the dependent variable (forest variables) of interest. In the Single-Tree Approach, the different configurations are evaluated in terms of the number of individual trees automatically detected, individual height and volume, using the forest inventory as the reference data. The experimental results have shown that for the Area-Based Approach there might exist significant variation in the model adjustment quality, depending on the configuration used and the investigated species. For the Single-Tree Approach, the results demonstrate in general that the configurations leading to higher point densities result in better performance. The results have also indicated that for a given point density, preference should be given for the configuration based on a lower flying height.

Keywords: LIDAR, Remote Sensing, Planted Forest, Forest Mensuration, Operational Parameters.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA | 28 |
| FIGURA 2.2 – PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO ENVOLVIDOS EM UM MAPEAMENTO UTILIZANDO SISTEMA LIDAR COM MECANISMO DE VARREDURA LINEAR | 29 |
| FIGURA 2.3 – DEFINIÇÕES UTILIZADAS PARA LINHA DE VARREDURA..... | 30 |
| FIGURA 2.4 – MÚLTIPLOS RETORNOS NO CONE DE DIFRAÇÃO DO FEIXE LASER EMITIDO .. | 32 |
| FIGURA 2.5 – SISTEMAS DE COORDENADAS E GRANDEZAS ENVOLVIDAS NA EQUAÇÃO (MODELO GEOMÉTRICO) DO LIDAR..... | 34 |
| FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 48 |
| FIGURA 3.2 – TALHÕES UTILIZADOS NO TRABALHO: (a) <i>Pinus taeda</i> (PLANTADO EM 2004) (b) <i>Eucalyptus</i> HÍBRIDO (PLANTADO EM 2006) (c) <i>Pinus taeda</i> (PLANTADO EM 1997)..... | 49 |
| FIGURA 3.3 – FAIXAS CORRESPONDENTES ÀS CONFIGURAÇÕES DE VOO INVESTIGADAS: I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e), VI (f), VII (g), VIII (h) | 54 |
| FIGURA 3.4 – DIFERENTES DIREÇÕES DE VOO REALIZADAS NO TALHÃO C UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I: FAIXAS LONGITUDINAIS (a) FAIXAS TRANSVERSAIS (b) FAIXAS INCLINADAS (c)..... | 55 |
| FIGURA 3.5 – DIFERENTES DIREÇÕES DE VOO REALIZADAS NO TALHÃO B UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I: FAIXAS LONGITUDINAIS (a) FAIXAS TRANSVERSAIS (b) FAIXAS INCLINADAS (c)..... | 56 |
| FIGURA 3.6 – COLETA DE DADOS NAS PARCELAS: ESQUEMA DO LEVANTAMENTO DA PARCELA..... | 58 |
| FIGURA 3.7 – MEDIÇÃO DO CAP UTILIZANDO TRENA DE LONA | 58 |
| FIGURA 3.8 – TRENA LASER E HIPSÔMETRO UTILIZADOS..... | 60 |
| FIGURA 3.9 – PARCELAS INSTALADAS NOS TALHÕES A, B E C | 62 |
| FIGURA 3.10 – RECEPTOR GPS (a) E ESTAÇÃO TOTAL (b) UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO | 67 |
| FIGURA 3.11 – PARÂMETROS DE ITERAÇÃO DO MÉTODO DE DENSIFICAÇÃO PROGRESSIVA | 69 |
| FIGURA 3.12 – BASE CONCEITUAL DO PROCEDIMENTO DE CORRESPONDÊNCIA PONTO-PLANO UTILIZADO (ADAPTADO DE HABIB <i>et al.</i> , 2010a) | 72 |
| FIGURA 3.13 – AJUSTAMENTO DE FAIXAS | 73 |
| FIGURA 3.14 – DISCREPÂNCIAS ENTRE O MDT GERADO E A INFORMAÇÃO DE CONTROLE . | 74 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 3.15 – METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DA NUVEM DE PONTOS CLASSIFICADA DO LIDAR..... | 78 |
| FIGURA 3.16 – FILTRO PASSA-BAIXAS UTILIZADO..... | 82 |
| FIGURA 3.17 – METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DAS ÁRVORES A PARTIR DOS DADOS DO LIDAR..... | 84 |
| FIGURA 4.1 – MODELO DIGITAL (TIN) GERADO A PARTIR DOS PONTOS DO ÚLTIMO RETORNO E DOS PONTOS CLASSIFICADOS COMO DE TERRENO DA CONFIGURAÇÃO I PARA OS TALHÕES A (a), B (b) E C (c)..... | 88 |
| FIGURA 4.2 – MODELO DE ALTURA GERADO A PARTIR DE DADOS SEM PRESENÇA DE VENTO (a) DADOS LEVANTADOS COM PRESENÇA DE VENTO (b) NO TALHÃO B..... | 95 |
| FIGURA 4.3 – FAIXAS SOBREPOSTAS (a), MODELOS DE ALTURA GERADOS CONSIDERANDO SOBREPOSIÇÃO DE FAIXAS (b), MODELOS DE ALTURA GERADOS APÓS REMOÇÃO DA SOBREPOSIÇÃO DE FAIXAS (c) | 96 |
| FIGURA 4.4 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME AO QUADRADO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: VOLUME AO QUADRADO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO III (PADRONIZADO) ... | 101 |
| FIGURA 4.5 – EIXO VERTICAL: VOLUME AO QUADRADO RESÍDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: VOLUME AO QUADRADO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO III (PADRONIZADO) | 101 |
| FIGURA 4.6 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE INVERSO DO VOLUME OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO).. | 102 |
| FIGURA 4.7 – EIXO VERTICAL: VOLUME AO QUADRADO RESÍDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: VOLUME AO QUADRADO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO)..... | 102 |
| FIGURA 4.8 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE INVERSO DO DIÂMETRO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO DIÂMETRO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO V (PADRONIZADO).... | 106 |
| FIGURA 4.9 – EIXO VERTICAL: INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO RESÍDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO V (PADRONIZADO) | 106 |
| FIGURA 4.10 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE INVERSO DO DIÂMETRO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO DIÂMETRO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO).. | 107 |
| FIGURA 4.11 – EIXO VERTICAL: INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO RESÍDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO) | 107 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.12 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE QUADRADO DA ALTURA OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: QUADRADO DA ALTURA ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO III (PADRONIZADO) ... | 111 |
| FIGURA 4.13 – EIXO VERTICAL: QUADRADO DA ALTURA RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: QUADRADO DA ALTURA ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO III (PADRONIZADO) | 111 |
| FIGURA 4.14 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE QUADRADO DA ALTURA OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: QUADRADO DA ALTURA ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO).. | 112 |
| FIGURA 4.15 – EIXO VERTICAL: QUADRADO DA ALTURA RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: QUADRADO DA ALTURA ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO)..... | 112 |
| FIGURA 4.16 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I (PADRONIZADO)..... | 119 |
| FIGURA 4.17 – EIXO VERTICAL: VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I (PADRONIZADO)..... | 120 |
| FIGURA 4.18 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO) | 120 |
| FIGURA 4.19 – EIXO VERTICAL: VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)..... | 121 |
| FIGURA 4.20 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE DIÂMETRO MÉDIO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I (PADRONIZADO)..... | 127 |
| FIGURA 4.21 – EIXO VERTICAL: DIÂMETRO MÉDIO RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I (PADRONIZADO) | 128 |
| FIGURA 4.22 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE DIÂMETRO MÉDIO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO) | 128 |
| FIGURA 4.23 – EIXO VERTICAL: DIÂMETRO MÉDIO RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)..... | 129 |
| FIGURA 4.24 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ALTURA MÉDIA OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: ALTURA MÉDIA ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)..... | 135 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.25 – EIXO VERTICAL: ALTURA MÉDIA RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ALTURA MÉDIA ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)..... | 135 |
| FIGURA 4.26 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE RAIZ QUADRADA DO VOLUME OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: RAIZ QUADRADA DO VOLUME ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VI (PADRONIZADO)..... | 139 |
| FIGURA 4.27 – EIXO VERTICAL: RAIZ QUADRADA DO VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: RAIZ QUADRADA DO VOLUME ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VI (PADRONIZADO)..... | 139 |
| FIGURA 4.28 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE DIÂMETRO MÉDIO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VIII (PADRONIZADO) | 143 |
| FIGURA 4.29 – EIXO VERTICAL: DIÂMETRO MÉDIO RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VIII (PADRONIZADO)..... | 143 |
| FIGURA 4.30 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ALTURA MÉDIA OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: ALTURA MÉDIA ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)..... | 147 |
| FIGURA 4.31 – EIXO VERTICAL: ALTURA MÉDIA RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ALTURA MÉDIA ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)..... | 147 |
| FIGURA 4.32 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO A..... | 151 |
| FIGURA 4.33 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ERRO VOLUME ABSOLUTO (%) OBTIDO ATRAVÉS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS. EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO | 152 |
| FIGURA 4.34 – EIXO VERTICAL: ERRO VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO | 152 |
| FIGURA 4.35 – ÁRVORES NÃO DETECTADAS NA PARCELA 24 DO TALHÃO B..... | 154 |
| FIGURA 4.36 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO B..... | 156 |
| FIGURA 4.37 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ERRO VOLUME ABSOLUTO (%) OBTIDO ATRAVÉS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS. EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO | 157 |
| FIGURA 4.38 – EIXO VERTICAL: ERRO VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO | 157 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.39 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO C..... | 159 |
| FIGURA 4.40 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ERRO VOLUME ABSOLUTO (%) OBTIDO ATRAVÉS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS. EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO | 160 |
| FIGURA 4.41 – EIXO VERTICAL: ERRO VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO | 160 |
| FIGURA 4.42 - ACERTO (%) IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES PARA OS TALHÕES A, B E C..... | 162 |
| FIGURA 4.43 – REMQ (%) ALTURA INDIVIDUAL PARA OS TALHÕES A, B E C..... | 162 |
| FIGURA 4.44 – ERRO (%) VOLUME PARA OS TALHÕES A, B E C..... | 163 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 3.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS TALHÕES..... | 51 |
| TABELA 3.2 – ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA ALTM 2050..... | 52 |
| TABELA 3.3 – CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS..... | 53 |
| TABELA 3.4 – NÚMERO DE FAIXAS E TEMPO DE VOO ASSOCIADOS ÀS CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS..... | 53 |
| TABELA 3.5 – CÓDIGOS DE QUALIDADE E SANIDADE ATRIBUÍDOS PARA CADA ÁRVORE DA PARCELA AMOSTRAL..... | 59 |
| TABELA 3.6 – COEFICIENTES DAS EQUACÕES HIPSOMÉTRICAS..... | 60 |
| TABELA 3.7 – COEFICIENTES DAS EQUACÕES BIOMÉTRICAS..... | 61 |
| TABELA 3.8 – INVENTÁRIO <i>Pinus taeda</i> (2004)..... | 63 |
| TABELA 3.9 – INVENTÁRIO <i>Eucalyptus</i> HÍBRIDO (2006)..... | 64 |
| TABELA 3.10 – INVENTÁRIO <i>Pinus Taeda</i> (1997)..... | 65 |
| TABELA 3.11 – VARIÁVEIS FLORESTAIS PROVENIENTES DO INVENTÁRIO FLORESTAL PARA FINS DE CONSTRUÇÃO DOS MODELOS (VARIÁVEIS DEPENDENTES)..... | 76 |
| TABELA 3.12 – DADOS EXTRAÍDOS DA NUVEM DE PONTOS DO LIDAR (VARIÁVEIS INDEPENDENTES) E SUAS TRANSFORMADAS..... | 77 |
| TABELA 4.1 – DENSIDADE DE PONTOS DE TERRENO..... | 87 |
| TABELA 4.2 – AJUSTAMENTO DE FAIXAS - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE A FAIXA DE REFERÊNCIA E AS DEMAIS FAIXAS DO TALHÃO A PARA CADA UMA DAS CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS..... | 90 |
| TABELA 4.3 – AJUSTAMENTO DE FAIXAS - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE A FAIXA DE REFERÊNCIA E AS DEMAIS FAIXAS DO TALHÃO B PARA CADA UMA DAS CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS..... | 91 |
| TABELA 4.4 – AJUSTAMENTO DE FAIXAS - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE A FAIXA DE REFERÊNCIA E AS DEMAIS FAIXAS DO TALHÃO C PARA CADA UMA DAS CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS..... | 92 |
| TABELA 4.5 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE OS DADOS DO LIDAR (AJUSTADOS) E A INFORMAÇÃO DE CONTROLE PARA O TALHÃO A..... | 93 |
| TABELA 4.6 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE OS DADOS DO LIDAR (AJUSTADOS) E A INFORMAÇÃO DE CONTROLE PARA O TALHÃO B..... | 93 |
| TABELA 4.7 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE OS DADOS DO LIDAR (AJUSTADOS) E A INFORMAÇÃO DE CONTROLE PARA O TALHÃO C..... | 93 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 4.8 – EXATIDÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE TERRENO GERADOS PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES E TALHÕES | 94 |
| TABELA 4.9 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME/HA..... | 98 |
| TABELA 4.10 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO VOLUME/HA | 98 |
| TABELA 4.11 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE RAIZ QUADRADO DO VOLUME/HA | 99 |
| TABELA 4.12 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE LOGARITMO DO VOLUME/HA | 99 |
| TABELA 4.13 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO VOLUME/HA | 100 |
| TABELA 4.14 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O DIÂMETRO MÉDIO | 103 |
| TABELA 4.15 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO DIÂMETRO MÉDIO..... | 104 |
| TABELA 4.16 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A, UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DO DIÂMETRO MÉDIO | 104 |
| TABELA 4.17 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A, UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A LOGARITMO DO DIÂMETRO MÉDIO | 104 |
| TABELA 4.18 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A, UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO | 105 |
| TABELA 4.19 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O ALTURA MÉDIA | 108 |
| TABELA 4.20 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DA ALTURA MÉDIA | 109 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 4.21 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DA ALTURA MÉDIA..... | 109 |
| TABELA 4.22 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DA ALTURA MÉDIA..... | 109 |
| TABELA 4.23 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DA ALTURA MÉDIA..... | 110 |
| TABELA 4.24 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME/HA..... | 114 |
| TABELA 4.25 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO VOLUME/HA | 115 |
| TABELA 4.26 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DO VOLUME/HA..... | 116 |
| TABELA 4.27 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DO VOLUME/HA..... | 117 |
| TABELA 4.28 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO VOLUME/HA | 118 |
| TABELA 4.29 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O DIÂMETRO MÉDIO | 122 |
| TABELA 4.30 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO DIÂMETRO MÉDIO..... | 123 |
| TABELA 4.31 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DO DIÂMETRO MÉDIO | 124 |
| TABELA 4.32 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DO DIÂMETRO MÉDIO..... | 125 |
| TABELA 4.33 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R , R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO | 126 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 4.34 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A ALTURA MÉDIA..... | 130 |
| TABELA 4.35 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DA ALTURA MÉDIA | 131 |
| TABELA 4.36 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DA ALTURA MÉDIA..... | 132 |
| TABELA 4.37 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DA ALTURA MÉDIA..... | 133 |
| TABELA 4.38 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DA ALTURA MÉDIA | 134 |
| TABELA 4.39 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O VOLUME/HA..... | 136 |
| TABELA 4.40 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO VOLUME/HA | 137 |
| TABELA 4.41 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADO DO VOLUME/HA..... | 137 |
| TABELA 4.42 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DO VOLUME/HA..... | 138 |
| TABELA 4.43 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO VOLUME/HA..... | 138 |
| TABELA 4.44 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O DIÂMETRO MÉDIO | 140 |
| TABELA 4.45 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO DIÂMETRO MÉDIO..... | 141 |
| TABELA 4.46 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DO DIÂMETRO MÉDIO | 141 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 4.47 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DO DIÂMETRO MÉDIO..... | 142 |
| TABELA 4.48 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO | 142 |
| TABELA 4.49 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A ALTURA MÉDIA..... | 144 |
| TABELA 4.50 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DA ALTURA MÉDIA | 145 |
| TABELA 4.51 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DA ALTURA MÉDIA..... | 145 |
| TABELA 4.52 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DA ALTURA MÉDIA..... | 145 |
| TABELA 4.53 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R ² , R ² (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DA ALTURA MÉDIA..... | 146 |
| TABELA 4.54 – REMQ (%) DAS VARIÁVEIS COMPUTADAS COM DADOS DA CONFIGURAÇÃO I DIREÇÕES INCLINADA E TRANSVERSAL UTILIZANDO EQUAÇÕES AJUSTADAS A PARTIR DOS DADOS DA CONFIGURAÇÃO I DIREÇÃO LONGITUDINAL..... | 149 |
| TABELA 4.55 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO A..... | 150 |
| TABELA 4.56 – VALORES DE R, R ² , R ² (AJUSTADO) E S _{xy} PARA O MODELO AJUSTADO RELACIONANDO O ERRO ABSOLUTO NO VOLUME E AS VARIÁVEIS DENSIDADE DE PONTOS, ALTURA DE VOO E ÂNGULO DE ABERTURA..... | 151 |
| TABELA 4.57 – RESULTADOS DA IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES PARA O TALHÃO B UTILIZANDO DADOS DA CONFIGURAÇÃO I..... | 153 |
| TABELA 4.58 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO B..... | 155 |
| TABELA 4.59 VALORES DE R, R ² , R ² (AJUSTADO) E S _{xy} PARA O MODELO AJUSTADO RELACIONANDO O ERRO ABSOLUTO NO VOLUME E AS VARIÁVEIS DENSIDADE DE PONTOS, ALTURA DE VOO E ÂNGULO DE ABERTURA..... | 156 |
| TABELA 4.60 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO C..... | 158 |

TABELA 4.61. VALORES DE R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) E S_{xy} PARA O MODELO AJUSTADO RELACIONANDO O ERRO ABSOLUTO NO VOLUME E AS VARIÁVEIS DENSIDADE DE PONTOS, ALTURA DE VOO E ÂNGULO DE ABERTURA..... 159

TABELA 4.62 – RESUMO RESULTADOS ABORDAGEM DE ÁRVORE INDIVIDUAL UTILIZANDO DIFERENTES DIREÇÕES DE VOO..... 164

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 24 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 24 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 25 |
| 1.2 | ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA | 26 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 27 |
| 2.1 | SISTEMAS LIDAR AEROTRANSPORTADOS | 27 |
| 2.1.1 | Introdução | 27 |
| 2.1.2 | Parâmetros de Configuração | 28 |
| 2.1.3 | Modelo Geométrico | 32 |
| 2.1.4 | Classificação dos Dados – Geração de Modelos Digitais de Terreno | 34 |
| 2.2 | TRABALHOS COM LIDAR EM APLICAÇÕES FLORESTAIS | 36 |
| 2.2.1 | Histórico do uso de LIDAR em aplicações florestais | 36 |
| 2.2.2 | Uso de LIDAR em aplicações florestais no Brasil | 41 |
| 2.3 | IMPACTO DA CONFIGURAÇÃO DE VOO NA DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS FLORESTAIS | 44 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 48 |
| 3.1 | ÁREA DE ESTUDO | 48 |
| 3.1.1 | Localização | 48 |
| 3.1.2 | Meio Físico | 49 |
| 3.1.3 | Meio Biótico | 51 |
| 3.1.4 | Caracterização dos Talhões | 51 |
| 3.2 | METODOLOGIA | 52 |
| 3.2.1 | Obtenção dos Dados | 52 |
| 3.2.1.1 | Dados do LIDAR | 52 |
| 3.2.1.2 | Dados de Campo | 57 |
| 3.2.1.2.1 | Inventário Florestal | 57 |
| 3.2.1.2.2 | Levantamento Topográfico | 66 |
| 3.2.2 | Classificação dos Dados do LIDAR | 68 |
| 3.2.3 | Avaliação da Exatidão dos Modelos Digitais de Terreno Obtidos a Partir dos Dados do LIDAR | 69 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.3.1 | Ajustamento de Faixas..... | 70 |
| 3.2.3.2 | Avaliação da Exatidão dos Modelos Digitais de Terreno | 74 |
| 3.2.4 | Obtenção de Variáveis Florestais | 74 |
| 3.2.4.1 | Abordagem em Nível de Parcela Amostral | 75 |
| 3.2.4.2 | Abordagem em Nível de Árvore Individual..... | 81 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 87 |
| 4.1 | OBTENÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE TERRENO | 87 |
| 4.2 | AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE TERRENO | 89 |
| 4.2.1 | Ajustamento das Faixas | 89 |
| 4.2.2 | Avaliação da Exatidão dos Modelos Digitais de Terreno | 92 |
| 4.3 | OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS FLORESTAIS | 94 |
| 4.3.1 | Abordagem em Nível de Parcela Amostral | 97 |
| 4.3.1.1 | Resultados Talhão A (<i>Pinus taeda</i> – 2004)..... | 97 |
| 4.3.1.2 | Resultados Talhão B (<i>Eucalyptus</i> Híbrido – 2006) | 112 |
| 4.3.1.3 | Resultados Talhão C (<i>Pinus taeda</i> – 1997) | 136 |
| 4.3.1.4 | Análise do Impacto da Direção das Linhas de Voo..... | 147 |
| 4.3.2 | Abordagem em Nível de Árvore Individual | 149 |
| 4.3.2.1 | Resultados Talhão A (<i>Pinus taeda</i> – 2004)..... | 149 |
| 4.3.2.2 | Resultados Talhão B (<i>Eucalyptus</i> Híbrido – 2006) | 153 |
| 4.3.2.3 | Resultados Talhão C (<i>Pinus taeda</i> – 1997) | 158 |
| 4.3.2.4 | Discussão Resultados Abordagem Árvore Individual | 161 |
| 4.3.2.5 | Análise do Impacto da Direção das Linhas de Voo..... | 163 |
| 5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 165 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 165 |
| 5.2 | RECOMENDAÇÕES | 169 |
| | REFERÊNCIAS..... | 172 |

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro, mais especificamente, o de florestas plantadas, apresenta números maiúsculos e expressivos. Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF, o setor totalizou um valor bruto de produção de R\$ 56,3 bilhões, exportando US\$ 4,7 bilhões e sendo responsável por 28,1% do saldo da balança comercial brasileira no ano de 2012 (ABRAF, 2013).

Em 2011 a área de florestas plantadas chegou a 7.005.125 ha, sendo que se destacam os plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* com áreas de 4.873.952 ha e 1.641.892 ha respectivamente, correspondendo a 69,6% e 23,4% da área total. Resulta clara a importância dessas duas espécies que juntas representam 93% da área plantada. O restante está ocupado por espécies como *Acácia*, *Seringueira*, *Paricá*, *Teca*, *Araucária* e *Populus*, etc. (ABRAF, 2012).

A distribuição geográfica dessas florestas indica que o *Eucalyptus* está presente em todas as regiões brasileiras, sendo que a região sudeste concentra 54,2% da área plantada, com destaque para os estados de Minas Gerais e São Paulo. Já as áreas plantadas com *Pinus* estão concentradas principalmente na região sul com 83% do total da área plantada, devido principalmente às condições edafoclimáticas e à localização dos principais centros processadores, principalmente no Paraná (40%) e em Santa Catarina (33%) (ABRAF, 2012).

Por estarem inseridas em um mercado global, com os preços internacionais balizando o mercado, as empresas florestais precisam ser competitivas para se manter e crescer em participação de mercado. Para tanto, investem continuamente em pesquisa, desenvolvimento, inovação e utilização de novas tecnologias, em todo o ciclo de produção, ou seja, no planejamento, no cultivo de mudas onde o uso de clones e espécies de 2ª geração já são realidade, nas técnicas de plantio, nos estudos de inventário, na colheita e no processamento.

As geotecnologias não ficam ausentes desse cenário. Como a principal matéria prima da indústria florestal é obtida em extensas áreas geográficas, a disseminação do uso de programas de tratamento de dados cartográficos sendo eles do tipo CAD (*Computer Aided Design*) ou GIS (*Geographic Information System*) foi muito rápida. A popularização dos receptores do tipo GPS também impulsionou a coleta de dados de precisão. Outra área de conhecimento que vem tendo grande expansão é a do sensoriamento remoto. Hoje já faz parte do dia a dia do cidadão

comum o uso de imagens provenientes de satélites e outros sensores imageadores. O uso mais sofisticado desses sensores se dá em aplicações ambientais e de engenharia. As opções disponíveis são muitas. Desde câmeras digitais portáteis, passando pelas câmaras aerofotogramétricas digitais, sensores multiespectrais, e sensores equipados com tecnologia RADAR (*Radio Detection and Ranging*) e LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Essa última, quando operada em plataformas de baixa órbita, isto é, em aeronaves, provê dados tridimensionais em quantidade e precisão nunca vistas.

Já na década de 80, ainda com a utilização dos primeiros e rudimentares equipamentos LIDAR, do tipo perfil "*profile*", isto é, sem escaneamento, estudos já mostravam que as aplicações florestais eram as que apresentavam resultados mais promissores e que seriam beneficiadas de imediato com a nova tecnologia. Com o advento dos equipamentos com a tecnologia de escaneamento, integração com GPS e sensores inerciais na década de 90, o número de aplicações aumentou, sendo aprimoradas técnicas para extração de informações florestais como alturas de árvores e diâmetro de copas, densidade, estratificação, estimativa de biomassa, etc, auxiliando nos levantamentos de inventários florestais.

Hoje a tecnologia LIDAR já é de uso frequente em diversas áreas da engenharia, e com os novos desenvolvimentos tecnológicos vem avançando e superando tecnologias tradicionais de sensoriamento como a da Fotogrametria. Baltasvias (1999a) faz uma comparação detalhada entre as técnicas e características da Fotogrametria e do LIDAR, apresentando as diferenças, vantagens e desvantagens em cada técnica, não deixando de citar as aplicações florestais como uma das que mais se beneficia da tecnologia. Conclui ainda que o LIDAR tem vantagem sobre a fotogrametria nas seguintes aplicações:

- 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;
- Mapeamento de superfícies com baixa diferenciação de texturas (gelo, areia, neve, pântanos);

- Mapeamento de corredores: rodovias (planejamento e projeto), linhas de transmissão (planejamento, projeto, georreferenciamento de torres, e estudos de recapacitação), linhas costeiras, rios e dutos;
- Geração de modelos digitais para regiões urbanas: determinação das alturas das edificações, planejamento de localização de antenas para telecomunicações;
- Mapeamento de áreas inundáveis: geração de modelos digitais de terreno como parâmetros de entrada para modelos de propagação de cheias e estudos de enchente, identificação de infraestrutura e áreas de risco, planos de contingência;
- Identificação e mapeamento de objetos de dimensões reduzidas, como cabos de linhas de transmissão.

Ackermann (1999), um respeitado pesquisador na área de fotogrametria da Universidade de Stuttgart, Alemanha, cita a revolução que os equipamentos LIDAR estão fazendo no setor de geotecnologias, principalmente em uso conjunto com outras fontes como a aerofotogrametria. Menciona também que o principal motivo para o grupo de pesquisadores da Universidade de Stuttgart se dedicarem ao estudo dessa tecnologia emergente é a possibilidade de se mapear topos de árvores e solo, gerando assim modelos de altura de vegetação.

No Brasil, os primeiros equipamentos LIDAR foram introduzidos comercialmente entre os anos de 2001 e 2002. Desde então, estudos científicos vem comprovando a aplicação de tecnologia LIDAR para o setor florestal em aplicações de inventário, planejamento, e gerenciamento de áreas plantadas.

Entretanto, apesar dos resultados positivos, a tecnologia não é usada de maneira frequente em aplicações de larga escala. Isso se deve, principalmente, ao custo de toda operação que compreende: voo, processamento e geração de produtos finais.

Infelizmente, algumas empresas ainda trabalham de maneira departamental, isto é, cada área opta por contratar a aquisição de dados conforme sua necessidade. É comum que determinada área opte por adquirir imagens de satélite para atividades de planejamento, e que outra área contrate ortofotocartas para estudos de meio ambiente, de desapropriação, e implantação de novas áreas de

plantio. Os custos que poderiam ser otimizados acabam sendo duplicados e conseqüentemente excessivos. Esta não é uma característica somente das empresas brasileiras. Carson *et al.* (2004), relata esse mesmo tipo de atitude em empresas florestais pesquisadas no Canadá, Suécia, Noruega, Áustria, Reino Unido, Austrália, Finlândia, Alemanha e Noruega, onde segundo o autor, as empresas não tiram proveito total das potencialidades de mapeamentos com essa tecnologia. Por exemplo, em um levantamento com LIDAR, é possível gerar mapas de declividade, definição de áreas sujeitas a erosão, definição de drenagem, base cartográfica para projeto de estradas rurais e de novas plantações, definição de micro bacias, base para cálculos hidrológicos, e base de estimativas de grandezas florestais (altura, diâmetro de copa), e cálculo de inventário. Assim sendo, a partir de um único levantamento de dados, diferentes áreas da empresa podem ser beneficiadas.

Ainda no trabalho de Carson *et al.* (2004), é relatado que o custo de levantamentos de campo em áreas de reflorestamento homogêneas, que necessitam de poucas parcelas de medição, é bem inferior ao do levantamento com LIDAR. Essa mesma conclusão é observada nas condições brasileiras e portanto referenda a necessidade de otimização da configuração de voo visando a redução dos custos variáveis, principalmente quanto ao número de horas de voo, que responde pela maior parcela desses custos.

O custo de um levantamento LIDAR, como em outros produtos de geotecnologia, é baseado em custos fixos e variáveis. No quesito custos fixos estão a depreciação dos equipamentos (Avião, LASER, GPS), seguros, entre outros. Na parcela custos variáveis encontram-se o número de horas de voo e de LASER, diárias de operadores de campo, deslocamento, entre outros.

É fato que a tecnologia não é barata, e que a sua operacionalização envolve o uso de aeronaves homologadas e licenciadas para tal finalidade, mercado esse reconhecido pelos altos preços praticados. Entretanto, ainda existe a falta de uma análise mais criteriosa da configuração mais adequada para determinado projeto. As alternativas possíveis através de ajustes de parâmetros na etapa de aquisição de dados (altura de voo, ângulo de varredura do sensor, direção de voo) podem mostrar ganhos que até hoje são desconhecidos.

Outra constatação é a de que a imensa maioria dos trabalhos publicados trata de dados de florestas de outros países e utiliza basicamente uma única

configuração de aquisição de dados, normalmente optando por uma configuração com baixa altura de voo (<1.000m) e pequeno ângulo de varredura, buscando assim obter uma alta densidade de pontos.

Em casos brasileiros, a configuração adotada na totalidade dos trabalhos analisados é a definida em LACTEC (2003a), sendo a altura de voo de 1.000 m e o ângulo de varredura de 7,5°. Essa configuração foi utilizada em um primeiro projeto demonstrativo da tecnologia, e utilizou como base referências de trabalhos realizados no exterior.

Após esse trabalho, vários outros foram desenvolvidos no Brasil. Voos foram realizados equipados com diferentes equipamentos, mas basicamente com as configurações de LACTEC (2003a).

Muitos destes trabalhos foram de avaliação da viabilidade do uso dos dados LIDAR em florestas plantadas, sendo em sua maioria voltados a extração de grandezas de interesse florestal como altura, número de indivíduos, volume e biomassa. Esses resultados foram comparados com resultados de campo e considerados satisfatórios, indicando que a tecnologia poderia ser aplicada em casos rotineiros. Chama a atenção que em muitos dos trabalhos, o levantamento tradicional em campo foi meticulosamente planejado, com a intensificação dos trabalhos muito além dos usuais, utilizando maior número de parcelas por talhão, medição de alturas de árvores muito acima do padrão recomendado, e limpeza de talhões antes das medições, ou seja, com condições controladas, próximas ao ideal, mas longe da realidade do dia a dia. É perfeitamente compreensível esse procedimento dado os objetivos dos trabalhos. Porém, também é necessário pesquisas considerando a realidade das empresas brasileiras no tocante aos tratamentos silviculturais e aos procedimentos de trabalho de campo de inventário.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

- Analisar a influência da utilização de diferentes configurações de voo para a aquisição de dados LIDAR na qualidade das variáveis extraídas de florestas plantadas, provendo desta forma, insumos para uma adequada análise custo-benefício, considerando de maneira independente as duas espécies mais plantadas no Brasil (*Eucalyptus* e *Pinus*) na realidade das empresas florestais brasileiras.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência da utilização de diferentes configurações de voo para a aquisição de dados LIDAR na qualidade dos modelos digitais de terreno derivados.
- Investigar a influência da configuração de voo utilizada na obtenção de variáveis florestais utilizando a Abordagem em Nível de Parcela Amostral, mais especificamente, investigar se a utilização de determinada configuração conduz a um modelo no qual as variáveis independentes melhor expliquem a variável florestal de interesse (modelo com melhor qualidade de ajuste) para diferentes espécies de floresta plantada (*Eucalyptus* e *Pinus*).
- Investigar a influência da direção de voo utilizada na obtenção de variáveis florestais utilizando a Abordagem em Nível de Parcela Amostral.
- Investigar a influência da configuração de voo utilizada na obtenção de variáveis florestais utilizando a Abordagem em Nível de Árvore Individual, mais especificamente, avaliar as diferentes configurações em termos do número de árvores automaticamente identificadas, altura individual e volume, tendo como referência os dados do inventário.
- Investigar a influência da direção de voo utilizada na obtenção de variáveis florestais utilizando a Abordagem em Nível de Árvore Individual.
- Construir/ajustar modelos relacionando o erro absoluto percentual em volume como variável dependente com as variáveis independentes, tais como: densidade média de pontos, altura de voo e ângulo de abertura.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA

A presente pesquisa está estruturada em 6 capítulos, incluindo-se a *Introdução*, além das referências bibliográficas.

O capítulo 2, *Revisão Bibliográfica*, apresenta a tecnologia LIDAR, seus fundamentos, componentes, parâmetros de configuração, e modelo geométrico. Na sequência apresenta-se o panorama dos estudos internacionais e nacionais, versando sobre a aplicação de LIDAR em florestas, ao longo das últimas 3 décadas, enfatizando suas conclusões e destacando a fonte de dados utilizados, principalmente quanto à configuração adotada. Também é apresentada uma revisão de trabalhos que tratam dos impactos de diferentes configurações nos resultados.

O capítulo 3, *Materiais e Métodos*, é dedicado principalmente à apresentação e discussão dos métodos que serão utilizados para consecução dos objetivos propostos. Na seção relativa à área de estudo é feita a sua caracterização considerando os meios físico e biótico. Na sequência são descritos os procedimentos de coleta de dados, sendo eles em campo (variáveis dendrométricas) e em voo (LIDAR). Também são apresentadas as técnicas de classificação de dados LIDAR, de avaliação de acurácia/precisão dos modelos digitais de terreno a partir de dados LIDAR. Por fim são apresentadas as duas metodologias para obtenção das variáveis florestais: Abordagem em Nível de Parcela Amostral e Abordagem em Nível de Árvore Individual.

O capítulo 4, *Resultados e Discussões*, apresenta os resultados obtidos pela aplicação das metodologias descritas, permitindo a comparação entre as diversas configurações de aquisição. Também são comentados estes resultados.

O capítulo 5, *Conclusões e Recomendações*, apresenta as principais conclusões bem como as recomendações para realização de estudos futuros dentro desta linha de pesquisa, indicando futuras investigações que podem partir da presente pesquisa.

Por último, no item *Referências*, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para a elaboração dessa pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMAS LIDAR AEROTRANSPORTADOS

2.1.1 Introdução

Os sistemas aerotransportados de varredura a LASER, internacionalmente conhecidos como LIDAR (*Light Detection And Ranging*) ou ALS (*Airborne LASER Scanner*) – termos esses que serão utilizados indistintamente neste documento, são sistemas de sensoriamento remoto ativo que se utilizam da tecnologia LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) para obtenção das coordenadas tridimensionais de uma grande quantidade de pontos mapeados na superfície do terreno de forma direta. O princípio básico de operação de tais sistemas consiste na medição da distância entre o sensor e o ponto mapeado no terreno. O georreferenciamento do ponto mapeado é possibilitado pelo sistema de posicionamento e orientação composto de um sistema de navegação inercial (INS – *Inertial Navigation System*) integrado a um sistema de posicionamento global (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*). O sistema GPS (*Global Position System*) é um dos sistemas GNSS existentes. A determinação da distância sensor-obstáculo pode ser realizada através de sistemas LASER de onda contínua (*CW - Continuous Wave*) ou sistemas LASER pulsados. Nos sistemas de onda contínua, a distância é determinada através da medição da diferença de fase entre o sinal transmitido e o sinal recebido. Tais sistemas LASER são geralmente utilizados em LIDAR terrestres, os quais objetivam a medição de distâncias relativamente curtas. A grande maioria dos sistemas LIDAR aerotransportados disponíveis comercialmente utilizam-se de LASER pulsado que provêm pulsos estreitos com alta potência sob alta taxa de repetição. Em tais sistemas, a determinação da distância é baseada no tempo de percurso (t), isto é, tempo entre a emissão e a recepção do pulso LASER (Figura 2.1). O comprimento de onda é fixo para um dado LASER, o qual para aplicações topográficas é geralmente do tipo Nd:YAG (Neodymium:Yttrium-Aluminum-Garnet), operando tipicamente na região do infravermelho próximo no comprimento de onda de 1.064 nm.

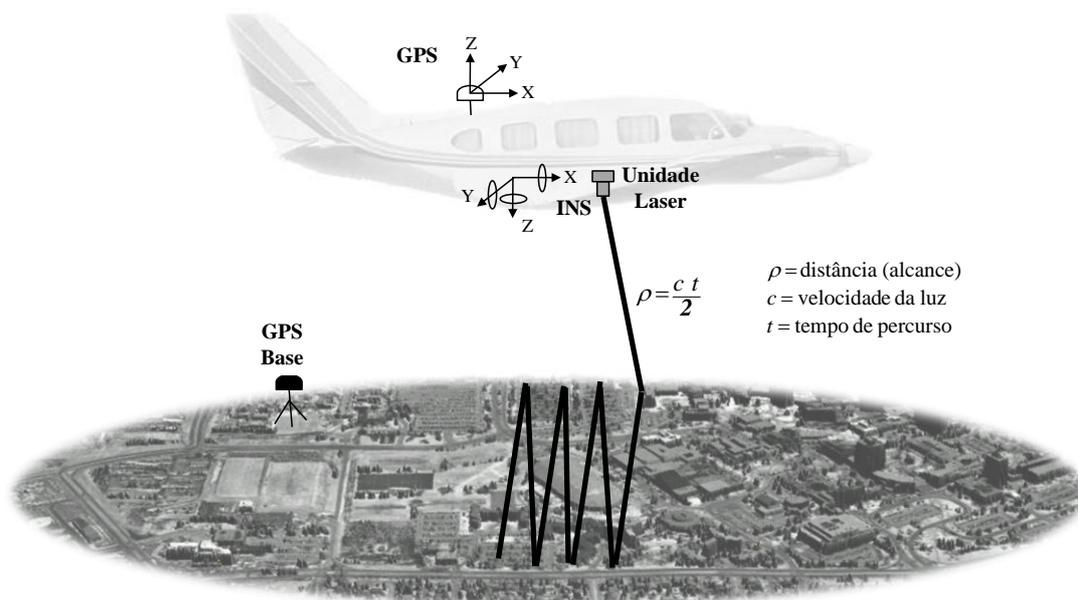


FIGURA 2.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA LIDAR

FONTE: ADAPTADO KERSTING (2011)

Para a coleta de uma faixa de dados, os equipamentos LIDAR utilizam-se de mecanismos de varredura. Dentre os mecanismos utilizados têm-se os polígonos de rotação, varredura Palmer e espelhos oscilantes (WEHR e LOHR, 1999). Os espelhos oscilantes, que abrangem a grande maioria dos equipamentos existentes, produzem um padrão de varredura linear em zig-zag (Figura 2.1). Neste item, será dado enfoque a sistemas que se utilizam de mecanismos de varredura linear, uma vez que o equipamento utilizado nesta pesquisa possui esta característica.

2.1.2 Parâmetros de Configuração

A qualidade da informação derivada a partir de um sistema LIDAR, bem como o custo do levantamento depende de um conjunto de parâmetros que podem ser configurados no planejamento da missão e/ou pelo operador do sistema. Estes parâmetros incluem: (i) altura de voo (H), (ii) ângulo de varredura ($-\beta; +\beta$), (iii) velocidade da aeronave (v), (iv) frequência de repetição do pulso LASER (frp), (v) frequência de varredura (fv), e (vi) divergência do feixe (γ). A partir destes, outros parâmetros são definidos como: (i) largura da faixa (L), (ii) espaçamento dos pontos ao longo da direção de voo (d_{along}), (iii) espaçamento dos pontos na direção

perpendicular à direção de voo (d_{across}), (iv) densidade de pontos (pontos por metro quadrado – ppm²), (v) diâmetro do feixe no terreno (*footprint*) (D). A Figura 2.2 ilustra alguns desses parâmetros.

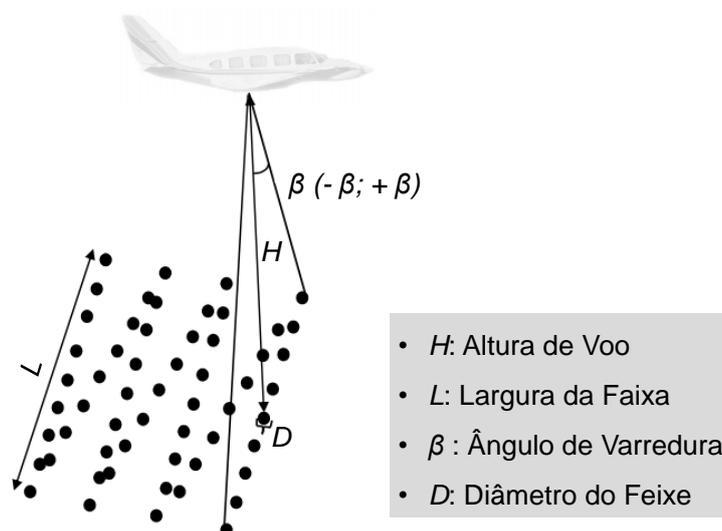


FIGURA 2.2 – PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO ENVOLVIDOS EM UM MAPEAMENTO UTILIZANDO SISTEMA LIDAR COM MECANISMO DE VARREDURA LINEAR

A altura de voo e o ângulo de varredura exercem grande influência não somente na densidade de pontos coletada como no custo do levantamento. A largura da faixa (L) é definida a partir desses parâmetros, conforme expressa a Equação 2.1. Quanto menor a largura da faixa resultante (através da redução da altura de voo e/ou do ângulo de varredura), maior a densidade de pontos coletada. Neste caso, maior será o número de faixas necessárias para recobrimento da área de estudo e, portanto, maior o custo do levantamento.

A frequência de repetição do pulso expressa o número de pulsos que são emitidos por segundo. Este parâmetro é o principal definidor da eficiência de um dado equipamento. Os sistemas são sempre configurados para operar na sua máxima frequência de repetição. Os atuais sistemas atingem até 500 kHz.

$$L = 2H \tan(\beta) \quad (2.1)$$

A frequência de varredura (frp) define o número de linhas de varredura que são coletadas por segundo. É importante mencionar que a definição de linha de varredura varia de um sistema para outro (BALTSAVIAS, 1999b). Uma primeira

definição (caso 1) seria a linha de varredura formada entre o intervalo $[-\beta; -\beta]$ ou de $[+\beta; +\beta]$. Uma segunda definição (caso 2) considera a linha de varredura formada entre o intervalo $[-\beta; +\beta]$ ou de $[+\beta; -\beta]$. As duas possíveis definições para linha de varredura para sistemas de varredura linear (padrão zig-zag) são ilustradas na Figura 2.3. O sistema LIDAR utilizado neste trabalho de pesquisa, o ALTM 2050, utiliza o caso 2 como definição.

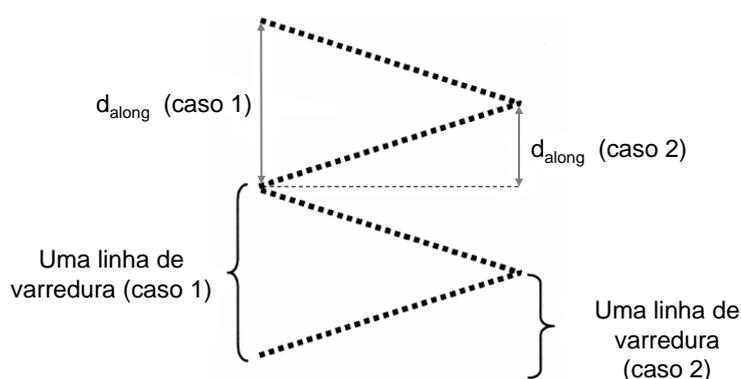


FIGURA 2.3 – DEFINIÇÕES UTILIZADAS PARA LINHA DE VARREDURA

FONTE: ADAPTADO BALTSAVIAS (1999b)

A frequência de varredura e a velocidade da plataforma são geralmente definidas com o objetivo de garantir uma distribuição regular de pontos no terreno, ou seja, que o espaçamento dos pontos ao longo da direção de voo (d_{along}) seja o mais próximo possível do espaçamento na direção perpendicular à direção de voo (d_{across}). O espaçamento entre os pontos ao longo da direção de voo (d_{along}), o qual depende da velocidade da aeronave (v) e da frequência de varredura (f_v) é expresso através da Equação 2.2, considerando terreno plano e horizontal. É importante notar que este valor irá variar dependendo da definição utilizada para linha de varredura (Figura 2.3).

$$d_{along} = \frac{v}{f_v} \quad (2.2)$$

O espaçamento entre os pontos na direção perpendicular à direção de voo (d_{across}), o qual depende da altura de voo (H), ângulo de varredura (β), da

frequência de repetição (frp) e da frequência de varredura (fv), é expresso através da Equação 2.3 (BALTSAVIAS, 1999b), considerando terreno horizontal e plano. Na Equação 2.3, N expressa o número de pontos em uma linha de varredura. Aqui novamente, é importante notar que este valor irá variar dependendo da definição utilizada para linha de varredura (Figura 2.3). Para o caso 2, o valor obtido através da Equação 2.3 deve ser multiplicado por dois.

$$d_{across} = \frac{2H \tan(\beta)}{frp} fv = \frac{L}{N} \quad (2.3)$$

Portanto, a densidade de pontos coletada irá depender de diversos fatores como a altura de voo, ângulo de varredura, frequência de varredura, velocidade da aeronave, frequência de repetição do sistema, topografia do terreno bem como propriedades de reflectância da superfície. Considerando superfície plana e horizontal, o número aproximado de pontos por metro quadrado (ppm^2) pode ser obtido através da Equação 2.4, assumindo que todos os retornos serão válidos (sem perdas devido à baixa reflectância da superfície). A resolução aproximada dos dados pode ser obtida através da Equação 2.5.

$$Densidade (ppm^2) = \frac{1}{d_{across} * d_{along}} \quad (2.4)$$

$$Resolução (m) = \sqrt{d_{across} * d_{along}} \quad (2.5)$$

O feixe de LASER emitido não é perfeitamente cilíndrico, mas possui formato cônico uma vez que diverge a um ângulo (γ), o qual é conhecido como ângulo de divergência. Devido a essa divergência, a projeção do feixe de LASER na superfície do terreno não é pontual, mas cobre uma área elementar (*footprint*). O ângulo de divergência varia tipicamente de 0,2 a 1,0 mrad (TOTH, 2010). O diâmetro do feixe no terreno (D) depende principalmente do ângulo de divergência e da altura de voo. Outros fatores como o ângulo instantâneo do feixe e a inclinação do terreno também exercem influência no formato e no tamanho da projeção do feixe no terreno (*footprint*). Maiores detalhes podem ser encontrados em Baltsavias (1999b).

No percurso sensor até a superfície da Terra, o feixe LASER emitido pode encontrar vários objetos dentro do cone de difração do feixe gerando desta forma múltiplos retornos (Figura 2.4). Sistemas comerciais da atualidade são capazes de registrar até seis retornos para cada pulso LASER emitido. Além disso, nos últimos anos, uma nova geração de sistemas LIDAR são dotados de mecanismos para digitalizar a onda completa de retro espalhamento (*full waveform*) para cada pulso LASER emitido. O equipamento utilizado nesta pesquisa é capaz de armazenar apenas o primeiro e o último retorno para cada feixe LASER emitido. No caso de regiões florestais, o primeiro retorno será geralmente proveniente da copa das árvores e o último proveniente de uma vegetação rasteira ou do terreno.

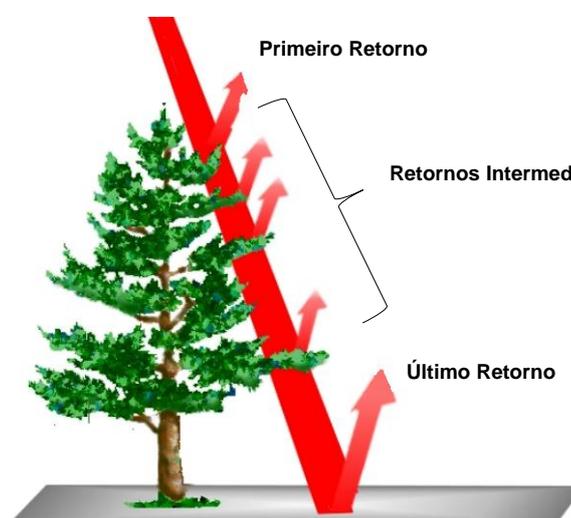


FIGURA 2.4 – MÚLTIPLOS RETORNOS NO CONE DE DIFRAÇÃO DO FEIXE LASER EMITIDO

2.1.3 Modelo Geométrico

As coordenadas tridimensionais dos pontos mapeados pelo LIDAR são derivadas através da utilização das observações de cada um dos componentes do sistema bem como os parâmetros que definem o relacionamento geométrico entre os sensores. O modelo matemático relacionando as observações e parâmetros do sistema com as coordenadas dos pontos, denominada equação do LIDAR (Equação 2.6), é obtida através da soma dos três vetores $r_b^m(t)$, r_{lu}^b e r_I^{lb} (ilustrados na Figura 2.5) após a aplicação das devidas matrizes de rotação: $R_b^m(t)$, R_{lu}^b e R_{lb}^{lu} .

$$r_I^m = r_b^m(t) + R_b^m(t)r_{lu}^b + R_b^m(t)R_{lu}^b R_{lb}^{lu} r_I^{lb} \quad (2.6)$$

Na Equação 2.6, o termo $r_b^m(t)$ representa o vetor conectando a origem do sistema de coordenadas do espaço objeto e a origem do sistema de coordenadas da unidade de medição inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*), o termo r_{lu}^b ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) – excentricidade (*lever arm*) – é o vector conectando a origem dos sistemas de coordenadas do IMU e da unidade LASER (definido relativamente ao sistema de coordenadas do IMU) e o termo r_I^{lb} é o vetor de alcance do LASER cuja magnitude (ρ) é equivalente à distância sensor-obstáculo. Deve-se notar que o termo $r_b^m(t)$ é obtido através do processamento dos dados GPS/INS o qual considera a excentricidade entre o sistema de coordenadas do IMU e o centro de fase da antena GPS. Já o termo $R_b^m(t)$ representa a matriz de rotação relacionando os sistemas de coordenadas do espaço objeto e do IMU, a qual é também determinada através do processamento dos dados GPS/INS. A matriz de rotação R_{lu}^b relaciona os sistemas de coordenadas do IMU e da unidade LASER, a qual é definida pelos ângulos de desalinhamento *roll*, *pitch* e *heading* ($\Delta\omega, \Delta\varphi$ e $\Delta\kappa$). Já a matriz de rotação R_{lb}^{lu} relaciona os sistemas de coordenadas da unidade LASER e do feixe LASER, a qual é definida pelo ângulo instantâneo de varredura. Todas as grandezas presentes na equação do LIDAR são provenientes das observações do sistema, exceto os ângulos de desalinhamento e as excentricidades entre a unidade LASER e o IMU, os quais são obtidos juntamente com erros sistemáticos nos ângulos e alcances medidos através de um procedimento de calibração (KERSTING, 2011).

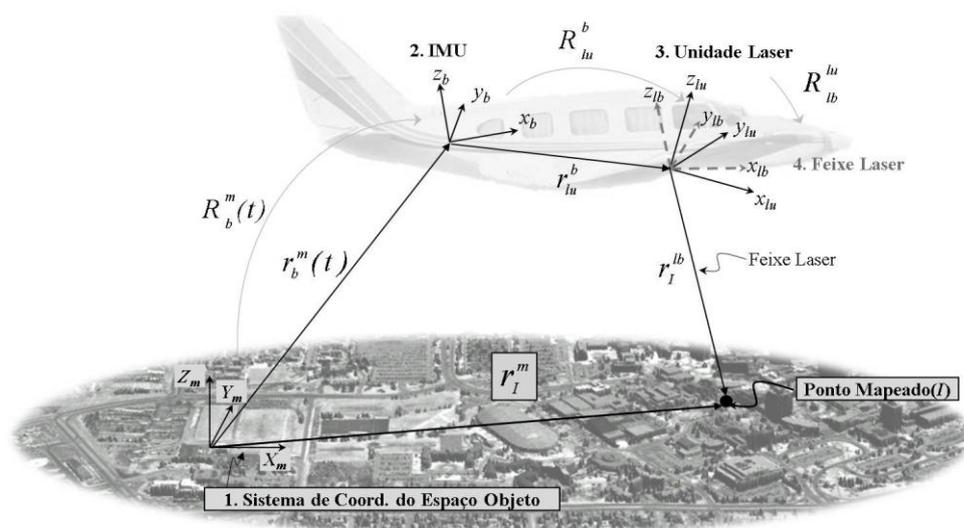


FIGURA 2.5 – SISTEMAS DE COORDENADAS E GRANDEZAS ENVOLVIDAS NA EQUAÇÃO (MODELO GEOMÉTRICO) DO LIDAR

FONTE: ADAPTADO KERSTING (2011)

A acurácia da nuvem de pontos proveniente de um sistema LIDAR depende de erros sistemáticos e aleatórios nas observações e parâmetros do sistema. A acurácia depende também das características/cobertura do terreno mapeado. Uma descrição detalhada dos fatores que afetam a acuracidade dos dados do LIDAR pode ser encontrada em Huising e Pereira (1998), Baltsavias (1999b) e Schenk (2001). A magnitude dos erros aleatórios depende principalmente da precisão das observações do sistema tais como posição e orientação da plataforma, ângulos e alcances medidos. Já os erros sistemáticos são principalmente causados por erros nos ângulos de desalinhamento e excentricidade entre os sensores, bem como erros sistemáticos nas observações do sistema.

2.1.4 Classificação dos Dados – Geração de Modelos Digitais de Terreno

Os dados obtidos a partir de um sistema LIDAR formam uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais, onde a superfície não é explicitamente descrita em termos da feição à qual pertence. Em regiões florestais, os pontos coletados devem ser classificados como sendo de terreno ou de vegetação.

Diversos algoritmos para a classificação de pontos de terreno, também denominados de métodos de filtragem, foram propostos por vários autores objetivando a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) a partir dos dados do

LIDAR. O primeiro grupo de métodos que podem ser identificados na literatura são os métodos baseados em morfologia matemática. Operações como dilatação e erosão, tipicamente utilizadas para expandir ou reduzir objetos em imagens binárias são estendidas para a análise de superfícies contínuas, como as obtidas a partir do LIDAR. A combinação da erosão e da dilatação geram operações de abertura e fechamento que podem ser utilizadas para filtrar os dados do LIDAR. Uma erosão seguida de uma dilatação resulta em uma operação de abertura, enquanto que uma operação de fechamento é obtida a partir da realização da dilatação primeiramente. Métodos de filtragem baseados no conceito de morfologia matemática têm sido propostos por vários autores (LINDENBERGER, 1993; KILIAN *et al.*, 1996; ALHARDTHY, 2003; ZHANG *et al.*, 2003; VOSSSELMAN, 2000; ROGGERO, 2001). Um segundo grupo de métodos que podem ser identificados na literatura são os baseados na densificação progressiva de um TIN (*Triangulated Irregular Network*) (AXELSSON, 2000; SOHN e DOWMAN, 2002). No algoritmo proposto por Axelsson (2000), os pontos de terreno são classificados através da construção iterativa de um modelo de superfície. O modelo inicial é obtido a partir da seleção local dos pontos mais baixos. Parâmetros de iteração são utilizados para a adição de mais pontos no modelo inicial. Mais detalhes sobre este método estão apresentados no item 3.2.2. O algoritmo proposto por Sohn e Dowman (2002) é baseado na densificação progressiva de um TIN, a qual é realizada em duas etapas de refinamento. A essência da abordagem é a geração iterativa de modelos de terreno onde a hipótese da superfície do terreno a ser formada localmente por planos é testada.

São também encontrados na literatura métodos baseados em predição linear e interpolação robusta hierárquica (KRAUS e PFEIFER, 1998; KRAUS e PFEIFER, 2001; PFEIFER *et al.*, 2001, BRIESE *et al.*, 2002) e métodos calcados em segmentação (JACOBSEN e LOHMANN, 2003; SITHOLE, 2005). Uma comparação detalhada de alguns dos métodos de filtragem disponíveis encontra-se em Sithole e Vosselman (2004).

A qualidade final de um MDT gerado utilizando os dados do LIDAR dependerá não somente do algoritmo utilizado para classificação dos pontos como de diversos outros fatores (KAREL *et al.*, 2006) como: (i) acurácia dos pontos mapeados, (ii) tipo de cobertura/características do terreno, (iii) densidade e

distribuição espacial dos pontos no terreno, (iv) algoritmo utilizado para filtragem e (v) método de interpolação empregado na geração do modelo.

2.2 TRABALHOS COM LIDAR EM APLICAÇÕES FLORESTAIS

2.2.1 Histórico do uso de LIDAR em aplicações florestais

Os primeiros trabalhos que utilizaram dados LIDAR para aplicações florestais datam do fim da década de 70 e início da década de 80. Kaartinen *et al.* (2012) cita o trabalho de Solodukhin *et al.* (1977), como sendo a referência mais antiga de aplicações LIDAR em florestas. Até então, muitas das pesquisas realizadas tratavam de aspectos batimétricos já que os equipamentos LIDAR disponíveis tinham por finalidade esse tipo de mapeamento. Como exemplo, o AOL (*Airborne Oceanographic LASER*) desenvolvido pela NASA, tinha como principal finalidade realizar o mapeamento de áreas do oceano Atlântico. Esse equipamento operava em modo perfil (*profile*), isso é, sem varredura, com frequência de 400 Hz, comprimento de onda de 0,337 μm , divergência do feixe de 5 mrad, com capacidade de medir 37 retornos, com altura de voo na faixa de 150 a 450 m. Em 1980, pesquisadores começaram a utilizar esse mesmo equipamento para mapeamento em geral e as aplicações florestais logo chamaram a atenção dos pesquisadores.

Outro equipamento desenvolvido especificamente para mapeamento de florestas é o SLICER (*Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery*) (BLAIR *et al.*, 1994), que possuía a capacidade de escaneamento transversal ao voo, frequência de varredura de 70 Hz, *footprint* de 10 m, e faixa mapeada de 50 m. Com esse arranjo era possível mapear não apenas perfis como o AOL mas faixas, melhorando assim as análises em nível de parcela. Com o uso desse equipamento, Means *et al.* (1999), em aplicação nas florestas coníferas do estado de Oregon, Estados Unidos, chegaram a coeficientes de correlação de 0,95 para altura e 0,96 para área basal. Quando comparado a resultados da época, considerando os resultados com equipamentos com pequeno *footprint*, os autores chegaram a resultados melhores.

O trabalho de Nelson *et al.* (1984) é considerado por muitos pesquisadores o trabalho mais completo dessa época. No referido trabalho, os autores utilizam dados do AOL coletados em uma área da Pensilvânia, Estados Unidos, na qual existiam

regiões florestais. Um dos objetivos do trabalho era verificar a viabilidade do uso dessa tecnologia na determinação da altura das árvores. Os resultados mostraram que o número de retornos proveniente do terreno em área de alta densidade de copas foi pequeno, diferente de áreas com menor densidade. A partir de fotos coloridas na escala 1:6.000 foram determinadas as alturas das árvores. As alturas médias estimadas do LIDAR, quando comparadas com as alturas derivadas da fotointerpretação, apresentaram diferenças menores que 1 m. Os autores também discutem as vantagens de se utilizar um ângulo de divergência menor. Mesmo sem a intenção, e mais devido à tecnologia existente a época, pode ser considerado o trabalho precursor da Abordagem em Nível de Parcela Amostral.

Aldred e Bonnor (1985) realizaram para o Serviço Florestal Canadense, um trabalho bastante detalhado e rigoroso sobre a aplicação do LIDAR em levantamentos florestais. São analisados dois tipos diferentes de LIDAR. O primeiro batimétrico, com frequência de varredura de 10 Hz, com divergência de feixe variável de 1 a 25 mrad, integrado com câmera fotográfica e vídeo. O segundo, um protótipo com finalidade topográfica, com objetivo de apoio à determinação da distância de aeronaves ao solo, com frequência de varredura de até 320 Hz, e com divergência de feixe de 2 mrad. Foram utilizadas quatro áreas de estudo, de maneira a contemplar diferentes declividades de terreno, diferentes espécies e idades, e diferentes densidades de copa. A conclusão do trabalho foi a de que o LASER com menor divergência tem maior capacidade de atingir o solo, principalmente em áreas de maior densidade de copas. Foram usados como dados de campo os levantamentos florestais existentes. Os resultados indicam que a estimativa de altura e densidade são aceitáveis, com tendência de subestimação das alturas médias. Como recomendação está a análise de estimativas de volume, e a necessidade de se melhorar o posicionamento dos pontos mapeados com o uso de GPS, sensores inerciais, acelerômetros verticais, e sensores barométricos.

Nelson *et al.* (1988) apresenta, um trabalho mais complexo, utilizando o mesmo sistema AOL, mas agora com voo sobre área de floresta plantada, basicamente com *Pinus*, no estado da Geórgia, Estados Unidos. Nesse trabalho foram coletados dados de campo em 125 parcelas ao longo da faixa de voo para comparação com os resultados do LIDAR. Foram medidas em campo as alturas de árvores, número de árvores, diâmetros e volumes, bem como testadas equações de

regressão visando o estabelecimento de relações entre as variáveis de campo e os dados obtidos em voo. A conclusão é de que os resultados são satisfatórios na estimativa de biomassa e volume, com os modelos explicando entre 53 e 65% a variância. As principais recomendações são a integração com receptores GPS, a coleta simultânea de imagens e o desenvolvimento de sistemas para automatização da extração de variáveis florestais.

Nilsson (1996), nessa mesma linha de estudo, apresenta trabalho realizado na Suécia, com *Pinus silvestris*, utilizando um equipamento desenvolvido pelo departamento de defesa da Suécia, para uso em helicópteros. Nesse caso, já se utilizou um GPS na aeronave para melhorar o posicionamento do LASER, fruto do avanço tecnológico e das recomendações de estudos anteriores. Os resultados, quando comparados com os levantamentos de campo, mostram um constante subdimensionamento das alturas. O menor ângulo de divergência usado foi de 2,5 mrad e o voo foi a 300 m. Mesmo com o GPS na aeronave, os resultados em termos de posicionamento continuaram longe do ideal.

O início da década de 90 é marcada pelo desenvolvimento de equipamentos comerciais, utilizando o aprendizado obtido com os equipamentos militares, e colocando à disposição do mercado equipamentos robustos, com maior grau de flexibilidade quanto à altura de voo, permitindo o escaneamento transversal, integração com sistema inercial e GPS, bem como a disponibilização de softwares para tratamento das informações. O que também se destaca é o menor ângulo de divergência, possibilitando a geração de *footprint* menores, conforme apresentado no item 2.1.2. Essa característica permite que o valor do retorno não seja degradado por alturas menores na vizinhança. O aspecto negativo é que, conforme a espécie é praticamente impossível obter dados do ponto mais alto da árvore.

O primeiro trabalho florestal a fazer uso desses equipamentos e considerado o primeiro trabalho florestal da era moderna do LIDAR foi de um pesquisador florestal norueguês, Erik Naesset, que tinha experiência em trabalhos com dados de geotecnologia, principalmente com foto interpretação para extração de variáveis florestais. Naesset (1997) utiliza dados de um levantamento de duas áreas no sudeste da Noruega, que não tinha objetivos florestais. O levantamento foi executado, por uma empresa comercial, em 1995 e utilizou um equipamento ALTM 1020, na época o estado da arte em sensores comerciais, com GPS e sensor

inercial integrados, com frequência de varredura de 2 kHz, ângulo de varredura de 20°, ângulo de divergência de 0,25 mrad e altura de voo entre 640 e 825 m. Nota-se que o sensor evoluiu muito em termos tecnológicos. Para verificação dos resultados foram levantados dados em parcelas distribuídas nas duas áreas de estudo. A altura foi medida em todas as árvores das parcelas devido ser uma característica importante da floresta. Os resultados apresentados mostram que as alturas médias foram subestimadas em torno de 4,1 a 5,5 m. Esses resultados subestimados repetem as conclusões encontradas nos trabalhos de Aldred e Bonnar (1985) e Nilsson (1996), citados nesse capítulo. Uma das explicações seria a alta frequência de mapeamento aliado a um pequeno *footprint* decorrente de um menor ângulo de divergência. Essas características permitem que um grande número de pontos chegue ao solo, mas pode penalizar a detecção do ponto mais alto da árvore. Apesar das diferenças encontradas, o autor concluiu que as alturas obtidas tiveram acurácia similar ou superiores àquelas extraídas a partir de fotogrametria de fotos aéreas, comentando que somente com equipamentos com a capacidade de escaneamento seriam possíveis aplicações em larga escala e que além das alturas, objeto do trabalho, outras grandezas poderiam ser geradas.

Os trabalhos iniciais com LIDAR em florestas, que utilizavam basicamente sistemas no modo perfil, com baixa taxa de emissão de pulsos, com grande *footprint*, e do tipo de CW (onda contínua) forneceram a base do que hoje é denominada Abordagem em Nível de Parcela. Esta metodologia utiliza toda a nuvem de pontos gerada, não se preocupando em individualizar árvores. Por essa característica, não necessita de alta densidade de pontos gerados, o que por sua vez diminui o custo do levantamento. Sua construção metodológica se baseia na premissa que os pontos de altura coletados em toda área de interesse, através de quantis e percentis dessa distribuição, guardam correlação com as grandezas florestais e suas transformadas, comumente utilizadas em nível de parcela. Mesmo com o advento de equipamentos tecnologicamente mais avançados, com *footprint* reduzido e maior capacidade de emissão de pulsos, a metodologia continua em uso. Naesset (2007) comparou diferentes trabalhos na Escandinávia, com diferentes densidades de pontos, e verificou que para variáveis como volume e área basal o erro percentual máximo encontrado foi de 8,4%. Hollaus (2006), entre outras análises, utilizou a metodologia descrita em Nelson *et al* (1984, 1988) trabalhando

com LIDAR com capacidade de escaneamento, obteve coeficientes de correlação superiores aos dos trabalhos originais, mostrando a importância da capacidade de varrer horizontalmente o terreno. Outras fontes que descrevem e avaliam a metodologia de Abordagem em Nível de Parcela são os trabalhos de Naeset (1997), Means *et al.* (1999), Lefsky *et al.* (2001), Maltamo *et al.*, (2006) e Zonete (2009).

A outra abordagem comumente utilizada é a denominada Abordagem em Nível de Árvore Individual. Com o desenvolvimento tecnológico dos sensores LIDAR, que passaram de uma frequência de 2 kHz em 1994 para 500 kHz em 2011, passou a ser possível o tratamento da nuvem de pontos de modo a individualizar cada árvore, estimando sua altura e seu diâmetro de copa. De posse dessas variáveis, é possível fazer uso das tradicionais e consagradas técnicas de inventário florestal. A técnica mais utilizada para delimitação da copa da árvore individual é a do máximo local, aplicado diretamente na nuvem de pontos, ou em modelo digital gerado a partir deste. Exemplos desse método são encontrados em Popescu *et al.* (2002), McCombs *et al.* (2003), Hyyppä *et al.* (2004), Maltamo *et al.* (2004), Kwak *et al.* (2007). Outra técnica utilizada é que faz uso de ferramentas de traçado de bacias hidrográficas, identificando os pontos mínimos de cada copa, denominado *watershed* (KWAK *et al.*, 2007). Popescu (2002), citado por Macedo (2009), utilizou filtragem local com janela móvel (tamanho variável), e além de utilizar o método “local máxima” para valores de Z, incluiu valores de intensidade melhorando o modelo. A janela móvel demonstrou ser útil para locais com diferenças de idade ou de espécies que possuem copas com formas diferentes. Kaartinen *et al.* (2012), realizaram uma comparação entre doze diferentes métodos de detecção de árvore individual, utilizando uma mesma base de dados, visando a uniformização dos resultados e comparações entre métodos. A área que serviu de base para os estudos localiza-se no sudeste na Finlândia, com terreno plano e ondulado, com predominância das espécies *Pinus sylvestris* e *Picea abies*. Os dados LIDAR foram adquiridos em 2004, com um sensor ALTM 2033 em uma altura de voo de 600 m, ângulo de varredura de 9°, e com frequência de 33 kHz. O trabalho teve a participação de pesquisadores da Alemanha, Suécia, Finlândia, Noruega, Taiwan, Estados Unidos, Itália e Suíça. Os resultados mostram que o método selecionado para a individualização tem mais importância do que a densidade de pontos. Os

autores citam que mesmo em densidades de 2 ppm² ou menor podem trazer resultados satisfatórios, dependendo da idade, espécie e adensamento da floresta. Entretanto, para florestas jovens, é indicada uma maior densidade, acima de 10 ppm² para a correta estimativa.

2.2.2 Uso de LIDAR em aplicações florestais no Brasil

No Brasil, os primeiros projetos ainda na forma de pilotos ocorreram em 2003. LACTEC (2003a, 2003b) realizou o primeiro trabalho com voo planejado com o objetivo exclusivo de se avaliar a capacidade do LIDAR em fornecer variáveis para uso florestal. Foram sobrevoadas áreas localizadas em Aracruz, Espírito Santo e Jacareí, São Paulo. Ambas as áreas eram florestas plantadas de *Eucalyptus*. Utilizou-se o equipamento ALTM 2050, em uma altura de voo de 1.000 m, e ângulo de varredura de 7,5°. Para demonstrar toda a potencialidade desse tipo de mapeamento, foram estimadas as alturas médias por talhão, o número de indivíduos, e gerados modelos digitais de terreno, de superfície, além de mapas de drenagem e declividade. Não foi possível comparar os resultados com os dados de campo já que essa etapa ficou sob a responsabilidade do cliente, e não foi repassada essa informação para a análise.

Pires (2005), a partir dos dados levantados por LACTEC (2003a), desenvolveu uma dissertação de mestrado na Universidade de Viçosa. O objetivo principal era a extração automática de alturas de indivíduos do gênero *Eucalyptus* a partir dos dados LIDAR. Foram realizados trabalhos de campo em 24 parcelas, sendo medidas as alturas de todas as árvores com o hipsômetro Sunnto (medida indireta), e após esse procedimento foram abatidas 2 árvores por parcela e medidas a altura com trena (medida direta). A metodologia adotada é o da Abordagem em Nível de Árvore Individual, mas a localização de cada indivíduo não é feita a partir dos pontos LASER e sim de superfícies geradas a partir desses pontos. Os resultados mostram que utilizando o teste *t*, a 1% de probabilidade, as alturas não diferem entre si, seja em medidas de alturas diretas ou indiretas.

Zandoná (2006), em sua dissertação de mestrado estuda a viabilidade da extração de variáveis dendrométricas a partir de dados LIDAR. A área de estudo foi no município de Pinhais, Paraná, com plantação de *Pinus*. A aquisição de dados foi realizada com o equipamento ALTM 2050, com altura de voo de 1.000 m e ângulo de varredura de 7,5°. Como dado de campo foi utilizado um inventário realizado em 2004. A metodologia adotada é a da Abordagem em Nível de Árvore Individual, e utiliza o conceito de máximo local obtido diretamente da nuvem de pontos LASER, evitando assim a perda de informações quando da geração de superfícies. Os resultados encontrados mostram que para a individualização de árvores o acerto foi de 82,8% considerando todas as árvores, e de 95,9% considerando as dominantes. Com relação à altura os resíduos variaram de 0,1 a 8,88%, sempre com a tendência de subestimação das alturas, fato esse já relatado em outros trabalhos.

Castro (2006), também em um trabalho de mestrado, utiliza os dados coletados em LACTEC (2003a) e tem por objetivo a delimitação de árvores individuais através da segmentação de imagens geradas pelo LIDAR a partir dos pontos mapeados e suavizadas por técnicas de tratamento de imagens. As técnicas de delimitação de copas e conseqüentemente dos indivíduos envolvem a filtragem gaussiana e a segmentação por crescimento de regiões, além de técnicas de morfologia matemática (filtragem morfológica e a segmentação por *watershed*). O trabalho não possuía dados de campo para verificação dos resultados.

Macedo (2009), desenvolve estudos de análise volumétrica em área plantada de *Eucalyptus* localizada no município de Igaratá, São Paulo, com idade de 4 anos. O voo de aquisição de dados ocorreu em agosto de 2008, com um equipamento ALTM 2050, com altura de voo de 1.000 m e ângulo de varredura de 7,5°. Foi realizado um trabalho de campo bastante denso, com 20 parcelas retangulares, onde foram medidos os diâmetros de todas as árvores e medidas as alturas das 10 primeiras mais a 5 dominantes definidas em função do diâmetro. Foi também realizado um intenso trabalho topográfico para se verificar a qualidade de pontos classificados como terreno. Para a extração dos parâmetros florestais optou-se por trabalhar com modelos digitais de terreno e elevação, e não diretamente com a nuvem de pontos. O modelo de terreno foi validado com os dados topográficos coletados para esse fim e apresentou resultados satisfatórios. Utilizou-se a metodologia da Abordagem em Nível de Árvore Individual, utilizando uma rotina de

busca ao máximo local. Os resultados para o número de indivíduos identificados, considerando todas as parcelas, teve um percentual de acerto de 93%, apresentando tendência de superestimativa. Já para a altura, o acerto médio foi de 97,74%. O volume foi calculado considerando a função de afilamento (*taper*) sendo que o erro encontrado entre os dados de campo e do LIDAR ficou em -1,8%.

O trabalho de Zonete (2009) se destaca por ser o primeiro e único, quando da finalização dessa revisão bibliográfica, a fazer uso no Brasil da metodologia de Abordagem em Nível de Parcela Amostral. A área de estudo foi no sul da Bahia em plantação de *Eucalyptus*. A aquisição de dados LIDAR ocorreu em 2008 com o uso do equipamento ALTM 3100, em voo com altura de 1.000m, ângulo de varredura de 7,5° e frequência de varredura de 50 kHz. A coleta de dados de campo, para efeito de ajuste dos modelos, foi realizada em 59 talhões, amostrando 192 parcelas circulares de 13 m de raio. Foram medidas as circunferências de todas as árvores e uma altura a cada 7 árvores. Para esse tipo de abordagem, foram construídos modelos para as variáveis de interesse (diâmetro médio, altura média, altura dominante, área basal e volume) e transformadas, tendo como parâmetros as medidas de altura da nuvem de pontos, diferenciadas em percentis, média e variância. A escolha final dos melhores modelos foi feita com base em valores estatísticos como coeficientes de regressão e raiz quadrada do erro médio. Não foi utilizado nenhum método de verificação. Como recomendação, o autor indica o estudo em nível de árvore individual no qual acredita que possa trazer resultados ainda melhores, mas que necessita de avançados conhecimentos em modelagem e grande suporte computacional.

O trabalho de Oliveira *et al.* (2012) tem por objetivo a estimativa do número de indivíduos em uma plantação de *Eucalyptus*. Utiliza como base de dados LIDAR o mesmo apresentado em Zonete (2009). Foram isolados dois talhões com 3 anos de idade. A metodologia adotada é a da geração de um modelo de altura de vegetação, através da diferença entre pontos classificados como copa e terreno. A partir dessa nuvem de pontos são geradas superfícies através de duas técnicas: TIN e IDW (ponderação pelo inverso da distância). A partir dessas superfícies é aplicado o método do máximo local, utilizando filtros de tamanho variados. Os resultados indicam que o método mais efetivo é o IDW, identificando 98,85% das árvores no primeiro talhão e 96,58% no segundo.

2.3 IMPACTO DA CONFIGURAÇÃO DE VOO NA DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS FLORESTAIS

A investigação da influência da configuração de voo utilizada na qualidade das variáveis florestais extraídas é de fundamental importância uma vez que um dos grandes entraves na operacionalização da tecnologia LIDAR em aplicações florestais encontra-se no alto custo associado. Uma maneira de reduzir os custos seria a utilização de configurações que resultassem em um menor número de faixas necessárias para cobrir a área de estudo. Embora no Brasil ainda não tenha sido realizado nenhum estudo neste sentido, na comunidade científica internacional, trabalhos visando suprir essa necessidade vem sendo realizados por vários autores, embora em número reduzido e em condições internacionais, o que reforça a necessidade da investigação realizada nesse trabalho de pesquisa com as condições intrínsecas brasileiras. O impacto tem sido investigado não somente visando a utilização de abordagens que buscam a extração de variáveis florestais em nível de árvore individual (YU *et al.*, 2004; LOVELL *et al.*, 2005; GOODWIN *et al.*, 2006) como também em nível de parcela amostral (NAESSET, 2004, 2009). De uma maneira geral, os trabalhos visam minimizar os custos associados ao levantamento LIDAR através da identificação dos parâmetros operacionais para um dado sistema e espécie investigada que produzam resultados aceitáveis.

O trabalho proposto por Yu *et al.* (2004) avalia o impacto da utilização de diferentes alturas de voo na determinação da altura individual em região de floresta boreal. Neste trabalho também é investigada a influência do tamanho do *footprint* do feixe de LASER no terreno e da densidade de pontos. Dados de campo foram obtidos em um total de 33 parcelas amostrais de dimensão 30x30m. Apenas as árvores com DAP (diâmetro a altura do peito) superior a 5 cm foram medidas. A posição, altura, DAP e a espécie das mesmas foram levantadas. Três alturas de voo foram consideradas no trabalho (400 m, 800 m e 1500 m). Estas alturas de voo resultaram em densidade de pontos de 10, 5 e 2,5 ppm², respectivamente. A divergência de feixe utilizada de 0,5 mrad produziu *footprints* com diâmetros de 0,2 m; 0,4 m e 0,75 m. Neste trabalho as árvores não são automaticamente identificadas. A partir da posição das árvores medidas em campo, um raio de busca

foi definido buscando pelo ponto mais alto para definição da altura da árvore proveniente do LIDAR. Para investigar o efeito da densidade de pontos e do tamanho do *footprint* de maneira independente, os dados foram reduzidos (decimados) artificialmente. De uma maneira geral os resultados indicaram que a acurácia da altura bem como o número de árvores detectáveis são reduzidas com o aumento da altura de voo. Os resultados também demonstraram que a densidade de pontos exerce maior influência na estimativa da altura das árvores do que o tamanho do *footprint*. Uma das deficiências desse trabalho encontra-se na ausência da utilização de métodos automáticos para detecção das árvores, a qual seria a realidade operacional. Na detecção automática, número maior de árvores não seria detectado, o que geraria um impacto muito maior no volume resultante do que a acurácia da altura. Outra questão diz respeito a análise de cenários artificiais que operacionalmente não aconteceriam, os quais são obtidos através de decimação dos dados.

Lovell *et al.* (2005) produziu dados LIDAR sintéticos buscando investigar a influência do padrão de varredura e outras características operacionais na acurácia da altura das árvores extraídas dos dados do LIDAR. Florestas plantadas com diferentes características (densidade do povoamento, espaçamento entre as linhas de plantio) foram simuladas e analisadas. Os dados do LIDAR foram simulados utilizando as características operacionais do sistema ALTM 3025. Portanto, mecanismo de varredura linear foi considerado (padrão zig-zag) e frequência de repetição de 25 kHz. A altura de voo utilizada em todos os cenários investigados foi a de 1.100 m. Diferentes densidades de pontos foram obtidas através da redução do ângulo de varredura (20°, 15°, 10°, 7°, 5°) ou através de múltiplas passadas sobre a área de estudo. As copas das árvores foram simuladas com formatos cônicos e elipsoidais. O impacto da direção das linhas de voo também é objeto do estudo. Os resultados indicam um relacionamento linear entre o espaçamento (vizinho mais próximo) entre os pontos LIDAR e a acurácia das alturas obtidas (altura dominante é utilizada para análise dos resultados). Outra conclusão encontrada foi a de que nas extremidades das faixas, onde se tem uma distribuição mais irregular dos pontos, a acurácia das alturas dominantes extraídas é degradada. Foi também demonstrado que a direção de voo não exerce influência na acurácia das alturas obtidas. Uma limitação deste trabalho encontra-se nas suposições utilizadas na simulação dos

dados do LIDAR. Uma das suposições é a de que o feixe LASER não diverge. Tal suposição acarreta subestimação da altura das árvores uma vez que a possibilidade do feixe atingir o topo da árvore fica reduzida. A outra suposição é a de que os objetos são sólidos e, portanto apenas o primeiro retorno é gerado.

No trabalho de Goodwin *et al.* (2006) a influência da utilização de diferentes alturas de voo (1.000, 2.000 e 3.000 m) foi investigada utilizando dados reais. O estudo foi realizado em 3 regiões de florestas de *Eucalyptus* com diferentes características de topografia e de estrutura da vegetação. O equipamento LIDAR utilizado foi o ALTM 3025 com registro do primeiro e do último retorno para cada feixe emitido. Foi observado que a habilidade do sistema registrar ambos os retornos é afetada significativamente pela altura de voo. Na altura de voo de 3.000 m, apenas em 40% dos dados foi possível o registro do segundo retorno devido a redução da intensidade de retorno do sinal. Os resultados em nível de parcela amostral demonstraram que métricas derivadas dos dados do LIDAR foram altamente correlacionadas com volume de copa derivados a partir de dados de campo ($R^2 = 0,79$). Observou-se também que a altura média dos pontos do primeiro retorno são significativamente afetados pela altura de voo utilizada. Em termos da acurácia da altura individual das árvores, notou-se pequena diferença para as três alturas de voo utilizadas. Esta pequena diferença é explicada pela grande área de copa (diâmetro de copa médio de 6,78m).

Naesset (2004) investiga o impacto da utilização de diferentes alturas de voo (entre 535 e 845 m) nas métricas derivadas do LIDAR bem como o impacto nas estimativas das variáveis florestais: altura média, área basal e volume. Mesmo ângulo de varredura foi utilizado para ambos os casos. O sistema utilizado foi o ALTM 1210. As métricas derivadas da nuvem de pontos do LIDAR abrangeram percentis de altura, altura máxima, altura média, coeficientes de variação da altura, densidade de copa para diferentes intervalos de altura. Essas métricas foram extraídas dos dados do primeiro e do último pulso. O impacto da altura de voo nas métricas derivadas do LIDAR foi avaliado através da diferença entre as mesmas obtidas usando as diferentes alturas de voo para cada parcela amostral de cada talhão. O desvio-padrão também foi computado visando análise da estabilidade das respectivas métricas. A influência da variação da altura de voo na estimação das variáveis florestais foi realizada através da simulação Monte Carlo, consistindo de

três etapas nas quais os dados do LIDAR foram combinados de acordo com um procedimento aleatório. Os resultados indicaram que as métricas derivadas do primeiro pulso são relativamente estáveis para variações de altura de até 60%. Já as métricas derivadas a partir do último pulso apresentaram variação significativa. As variáveis florestais estimadas não se apresentaram significativamente influenciadas para a variação de altura investigada. Uma das limitações deste trabalho encontra-se na utilização de alturas de voo com variação de apenas 60%.

Naesset (2009) avalia o impacto da utilização de diferentes equipamentos LIDAR nas métricas extraídas dos dados do LIDAR. As métricas extraídas incluem percentis de altura, valores de altura máximos e médios, coeficientes de variação da altura, densidade de copa para diferentes intervalos de altura. Os valores de altura do primeiro e do último pulso foram utilizados separadamente para derivação de tais métricas. Os equipamentos utilizados foram o ALTM 1233 e o ALTM 3100. Os dados utilizando o sistema ALTM 1233 foram adquiridos a partir de uma altura de 1200 m com PRF de 33 kHz (a qual é fixa para este equipamento). Os dados utilizando o sistema ALTM 3100 foram coletados utilizando as seguintes configurações: (i) 1100 m de altura e frequência de repetição de 50 kHz, (ii) 1100 m de altura e frequência de repetição de 100 kHz e (iii) altura de voo de 2000 m e frequência de repetição de 50 kHz. No trabalho foi observado um deslocamento na altura de 30 cm entre os dados do primeiro pulso obtidos pelos diferentes instrumentos. As variáveis relacionadas com densidade também diferiram significativamente entre os dois sensores utilizados. As comparações relativas às diferentes alturas de voo e frequências de repetição revelam um deslocamento ascendente nas alturas para a maior altura de voo (2000 m) e frequência de repetição mais baixa (50 kHz). Notou-se também que a distribuição dos retornos (único, primeiro e último) teve variação significativa entre as aquisições. Para avaliar a influência do instrumento utilizado, altura de voo e frequência de repetição, regressão *stepwise* foi utilizada para relacionar as métricas derivadas do LIDAR com as variáveis florestais: altura média e volume. Foram constatadas através de validação cruzada pequenas diferenças em precisão para as diferentes aquisições, porém diferenças sistemáticas foram observadas (por exemplo, 10,7% para o volume).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os procedimentos metodológicos utilizados para consecução dos objetivos deste trabalho.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Localização

A área de estudo localiza-se no município de Telêmaco Borba, que segundo a divisão adotada pelo IBGE (IPARDES, 2010) pertence a mesorregião geográfica Centro-Oriental Paranaense e microrregião geográfica de Telêmaco Borba. É considerado um polo industrial na região, sendo a indústria madeireira e a produção do papel os maiores empregadores e arrecadadores de receita no município.

Para realização deste trabalho foram utilizados três talhões situados em fazendas pertencentes à empresa KLABIN S/A. A localização dos três talhões utilizados nos estudos, com plantios de *Pinus taeda* (plantados em 2004 e 1997) e *Eucalyptus* Híbrido (plantado em 2006), é mostrada nas Figuras 3.1 e 3.2.

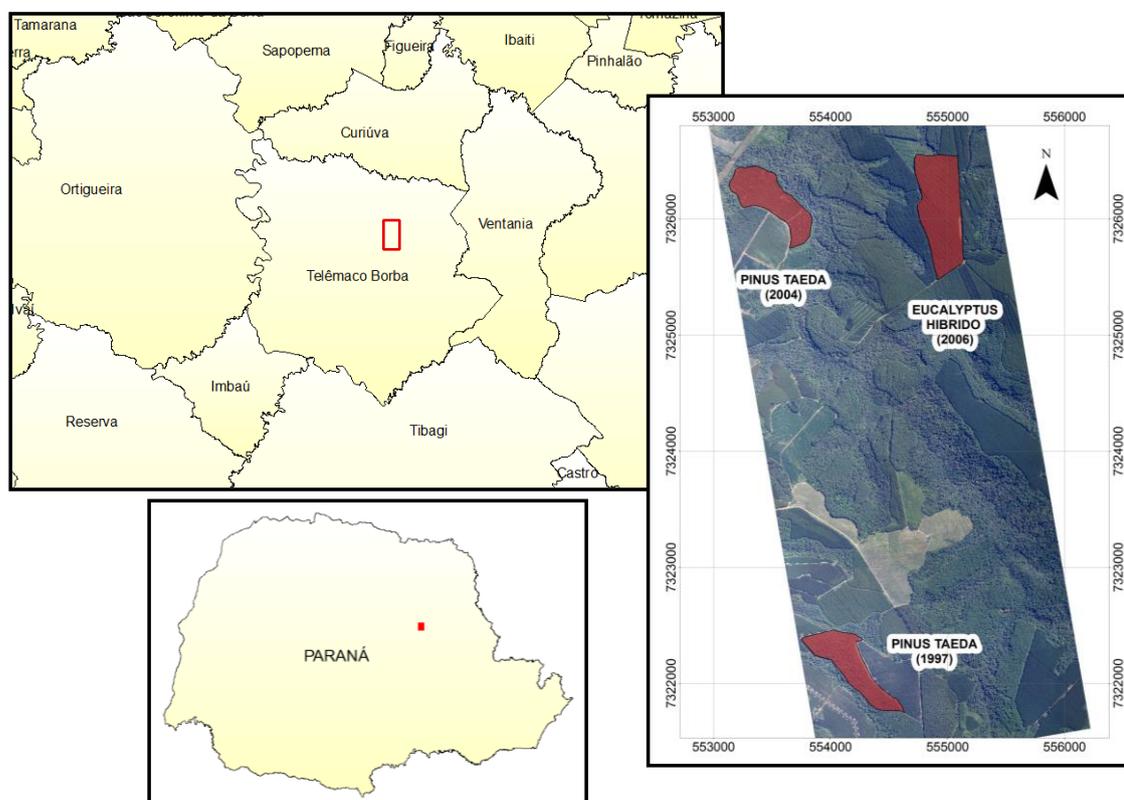


FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

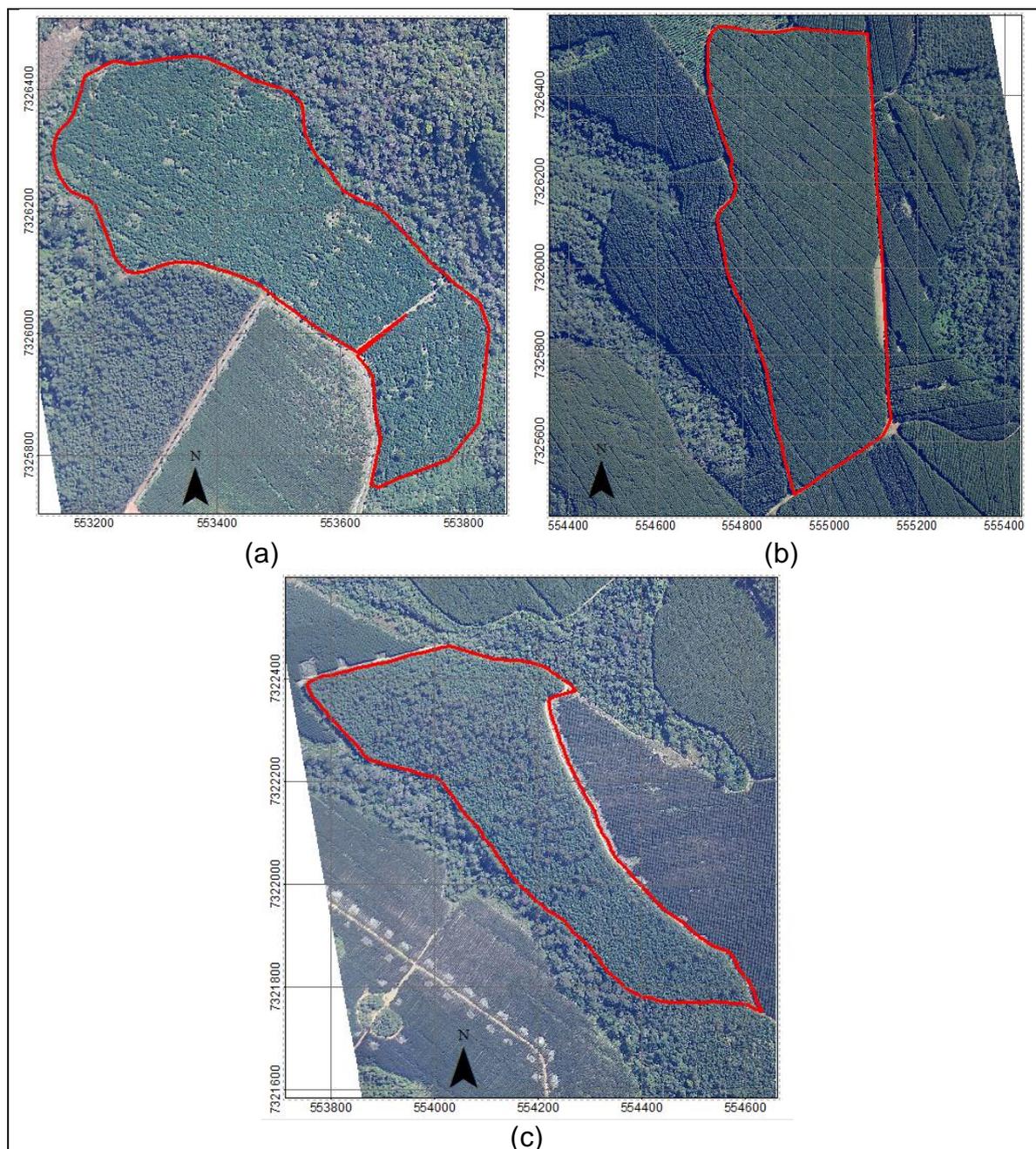


FIGURA 3.2 – TALHÕES UTILIZADOS NO TRABALHO: (a) *Pinus taeda* (PLANTADO EM 2004) (b) *Eucalyptus* HÍBRIDO (PLANTADO EM 2006) (c) *Pinus taeda* (PLANTADO EM 1997)

3.1.2 Meio Físico

Para a caracterização das variáveis meteorológicas na região de estudo utilizou-se dados da estação meteorológica de Telêmaco Borba, pertencente ao IAPAR e relativo ao período 1976 a 2011.

A região em estudo está submetida ao tipo climático Cfa, clima subtropical úmido, conforme a classificação de Köppen. Esse tipo climático é caracterizado por

apresentar verões quentes, geadas pouco frequentes e precipitação bem distribuída durante o ano. A temperatura média no mês mais frio fica abaixo de 18°C (mesotérmico) e no mês mais quente fica acima de 22°C, não apresentando estação seca definida (IAPAR, 2012).

Considerando a variável temperatura, a região apresenta temperatura média anual de 18,6°C, sendo que no mês mais quente (janeiro) a temperatura média é de 22,5°C e no mês mais frio (julho) a temperatura média é de 13,8°C. A temperatura máxima absoluta registrada no município foi de 38,2°C no mês de novembro de 1985. Já a temperatura mínima absoluta registrada foi de -5°C em julho de 1978.

Em relação à precipitação, a média anual é de 1614 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso, com 206,3 mm, com uma média de 16 dias de chuva, e agosto o mês mais seco com 72,4 mm, com uma média de 8 dias de chuva. O máximo de precipitação acumulada em 24 horas no município foi registrada em janeiro de 2003 com 151,8 mm. Considerando esses dados confirma-se a característica de clima sempre úmido para a região.

A média da umidade relativa na região é de 78,5%, a evaporação total anual é de 852 mm e o total de insolação anual é de 2301 horas. A velocidade média anual do vento é de 1,7 m/s, com predominância de ventos de sudeste. Nota-se a presença de ventos constantes na região, verificado inclusive nas campanhas de medição.

No tocante a hidrografia, a região está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi, especificamente na Unidade Hidrográfica do Alto Rio Tibagi. Na área em estudo os quatro principais corpos de água são: Ribeirão Invernadinha, Ribeirão Pinheiro Seco, Ribeirão das Antas e Arroio das Pacas.

A área de estudo está inserida na unidade morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná. A direção geral da morfologia é NW/SE, modelada em rochas do Grupo Itararé e Formação Ponta Grossa.

Os solos presentes na área são classificados como Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos, Latossolos Vermelhos Distroféricos e Latossolos Vermelhos Distróficos.

O local de estudo está situado a uma altitude entre de 680 a 951 m e apresenta uma declividade média de 15%.

3.1.3 Meio Biótico

Na região de estudo, assim como a urbanização, a agricultura e outras atividades antrópicas, o plantio florestal vem se expandindo e ocupando locais anteriormente povoados por flora nativa.

Os fragmentos florestais remanescentes já alterados pela retirada de madeira e lenha, pastoreio no sub-bosque e deposição irregular de resíduos, acabam sendo suprimidos parcial ou totalmente para dar lugar a povoamentos florestais.

Em outra época, na mesma região, predominavam remanescentes de vegetação nativa de Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucárias) e áreas de campos (Estepe Gramíneo Lenhosas).

A região de estudo é ocupada por plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* com diferentes idades, e alguns fragmentos da floresta nativa.

3.1.4 Caracterização dos Talhões

A caracterização dos talhões utilizadas nesta pesquisa é mostrada na Tabela 3.1. O Talhão A possui área total de 21,17 km², o Talhão B área total de 32,56 km² e o Talhão C área total de 20,14 km².

TABELA 3.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS TALHÕES

| Talhão | Data Plantio | Data Medição | Idade (anos) | Espaçamento Plantio (m) | Gênero Espécie | Material Genético |
|--------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| A | 01/05/2004 | 01/12/2009 | 5.59 | 2,5 x 2,5 | <i>P. taeda</i> | Pomar 1 ^a geração |
| B | 01/09/2006 | 25/11/2009 | 3.24 | 3,0 x 2,5 | <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> | CL2361 |
| C | 01/12/1997 | 27/11/2009 | 12.00 | 2,5 x 2,5 | <i>P. taeda</i> | Pomar 1 ^a geração |

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Obtenção dos Dados

3.2.1.1 Dados do LIDAR

O levantamento dos dados do LIDAR foi realizado pelo LACTEC utilizando equipamento Laser Scanner Aerotransportado modelo ALTM 2050 do fabricante canadense Optech Inc. As especificações do sistema são mostradas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 – ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA ALTM 2050

| | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Altura Operacional | 200 – 2000m (nominal) |
| Precisão Altimétrica | < 15 cm a 1200 m; 1σ < 25 cm a 2000 m; 1σ |
| Ângulo de Abertura | Variável de 0 a $\pm 20^\circ$ |
| Largura da Faixa | Variável de 0 a 0.72 x altura do voo |
| Resolução Angular | 0,01° |
| Frequência de Varredura | Variável; (baseado no ângulo de abertura) |
| Precisão Planimétrica | 1/200 x altura; 1σ |
| Taxa de Repetição do Pulso Laser | 50 kHz |
| Divergência do Feixe | Variável; 0.2 mrad; ou 0.8 mrad (1/e), nominal |
| Intensidade | Registro da intensidade de retorno do pulso laser |
| Medidores Duplos do Intervalo de Tempo | Registro simultâneo do primeiro e do último retorno para cada pulso laser emitido |

Um dos principais objetivos desta pesquisa é a análise do impacto da utilização de diferentes configurações de voo para a aquisição de dados LIDAR na qualidade das variáveis florestais extraídas. As configurações de voo planejadas estão descritas na Tabela 3.3 e ilustradas na Figura 3.3. Foi investigado o impacto da utilização de diferentes alturas de voo e ângulos de varredura.

TABELA 3.3 – CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS

| Config. | Altura de Voo (m) | Ângulo de Varredura (m) | Velocidade da Aeronave (km/h) | Frequência de Varredura (Hz) | Frequência de Repetição do Pulso (kHz) | Largura da Faixa (m) | Densidade teórica (ppm ²) |
|---------|-------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| I | 700 | 3,5 ^o | 222 | 70 | 50 | 85,6 | 9,45 |
| II | 700 | 6 ^o | 222 | 70 | 50 | 147,1 | 5,50 |
| III | 700 | 11 ^o | 222 | 53,6 | 50 | 272,1 | 2,98 |
| IV | 700 | 20 ^o | 222 | 39,2 | 50 | 509,6 | 1,59 |
| V | 2000 | 3,5 ^o | 222 | 70 | 50 | 244,7 | 3,31 |
| VI | 2000 | 6 ^o | 222 | 70 | 50 | 420,4 | 1,93 |
| VII | 2000 | 11 ^o | 222 | 31,6 | 50 | 777,5 | 1,04 |
| VIII | 2000 | 20 ^o | 222 | 23,1 | 50 | 1455,9 | 0,56 |

A Tabela 3.4 mostra o número de faixas e o tempo de voo, os quais são proporcionais ao custo do levantamento, associados a cada configuração estudada.

TABELA 3.4 – NÚMERO DE FAIXAS E TEMPO DE VOO ASSOCIADOS ÀS CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS

| Configuração | Número de Faixas | Tempo de Voo (min) |
|--------------|------------------|--------------------|
| I | 24 | 199,66 |
| II | 15 | 106,83 |
| III | 8 | 52,36 |
| IV | 4 | 20,88 |
| V | 9 | 58,74 |
| VI | 5 | 28,00 |
| VII | 3 | 16,96 |
| VIII | 2 | 7,89 |

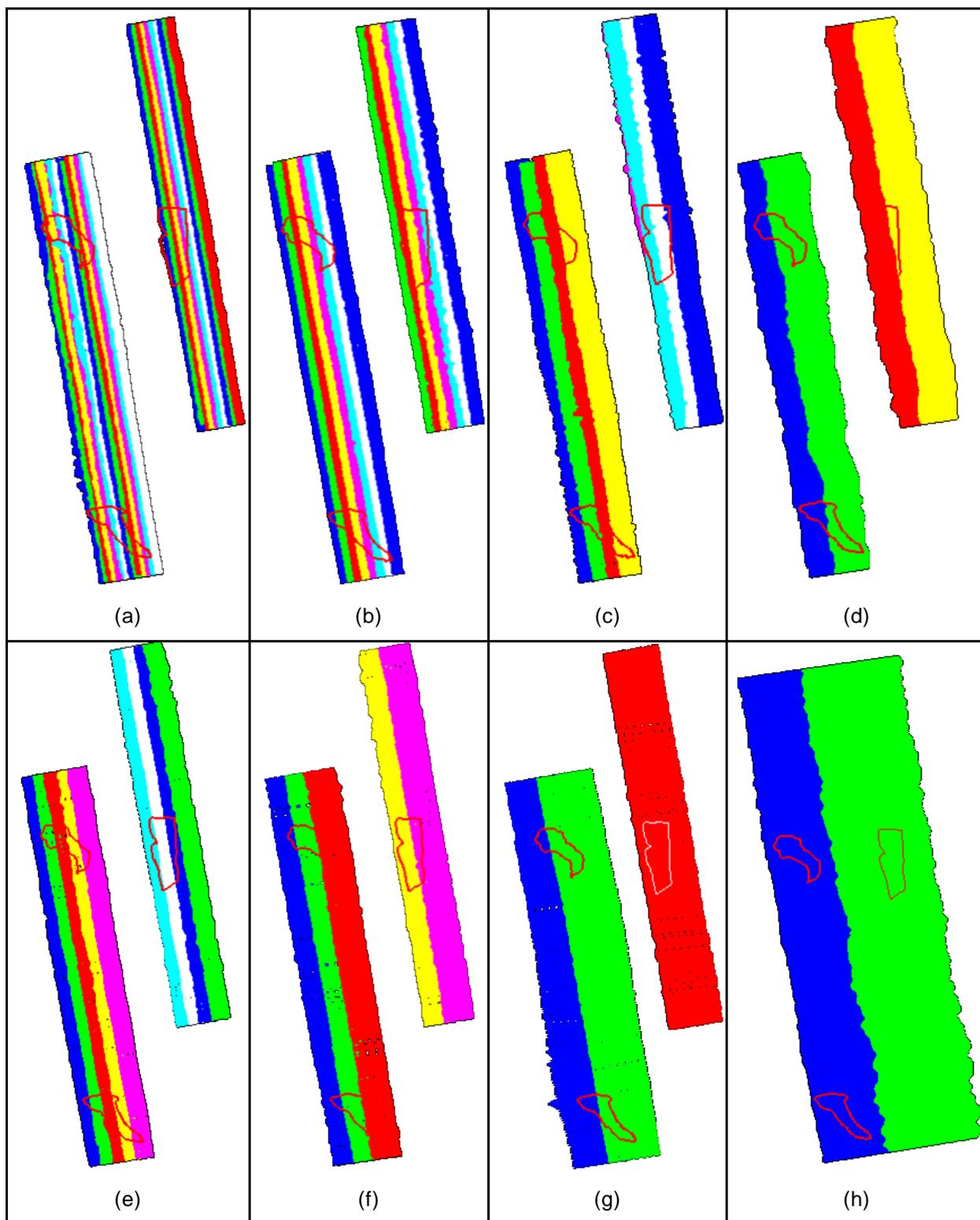


FIGURA 3.3 – FAIXAS CORRESPONDENTES ÀS CONFIGURAÇÕES DE VOO INVESTIGADAS: I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e), VI (f), VII (g), VIII (h)

A direção das linhas de voo em projetos convencionais é geralmente definida visando a otimização do tempo de voo. Para avaliar a influência da direção de voo utilizada na extração das variáveis florestais, parte do Talhão B (Figura 3.4) e do Talhão C (Figura 3.5) foram sobrevoadas utilizando três diferentes direções de voo, as quais foram denominadas neste trabalho de longitudinal (Figuras 3.4a e 3.5a), transversal (Figuras 3.4b e 3.5b) e inclinada (Figuras 3.4c e 3.5c), usando a configuração I.

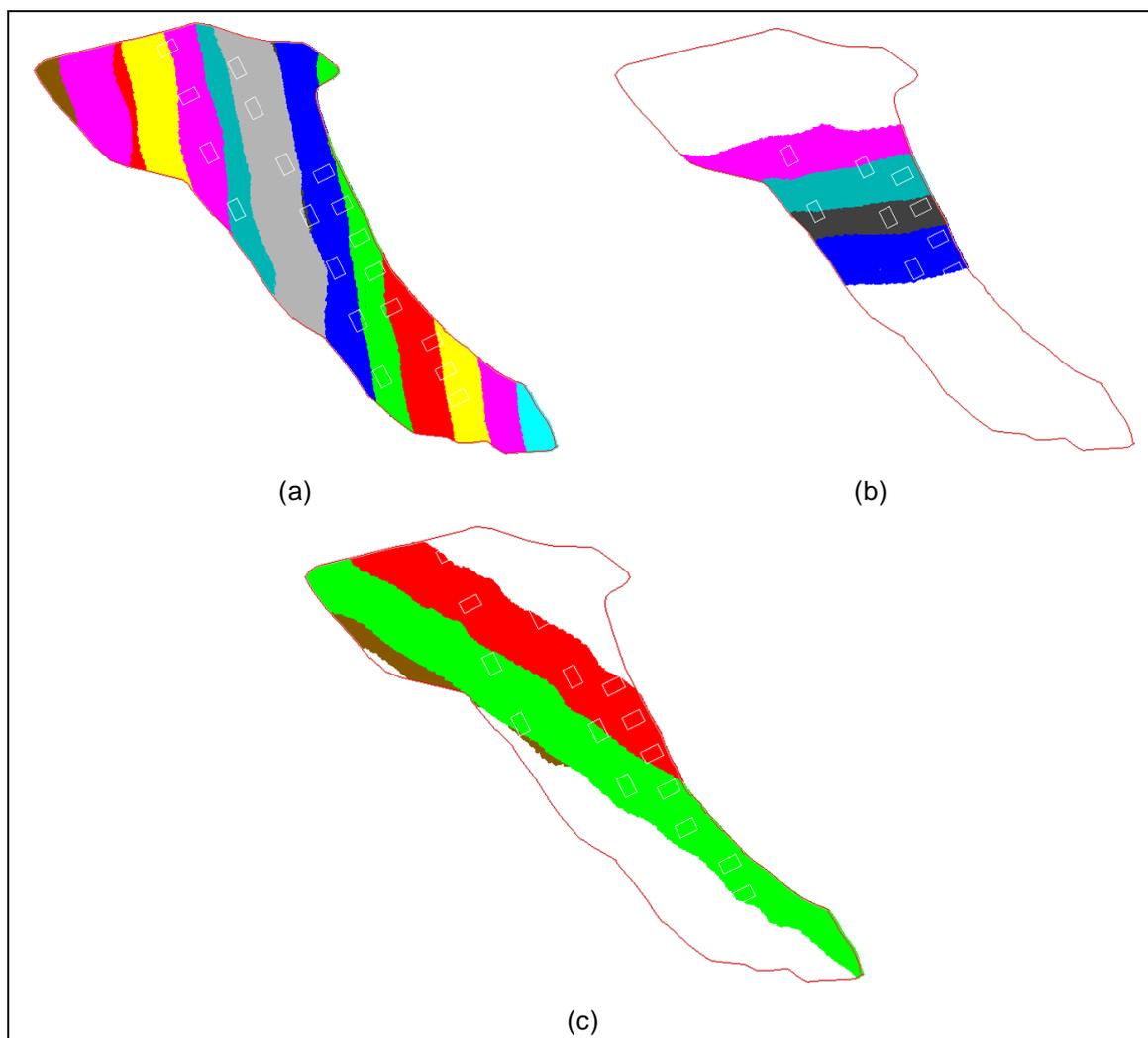


FIGURA 3.4 – DIFERENTES DIREÇÕES DE VOO REALIZADAS NO TALHÃO C UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I: FAIXAS LONGITUDINAIS (a) FAIXAS TRANSVERSAIS (b) FAIXAS INCLINADAS (c)

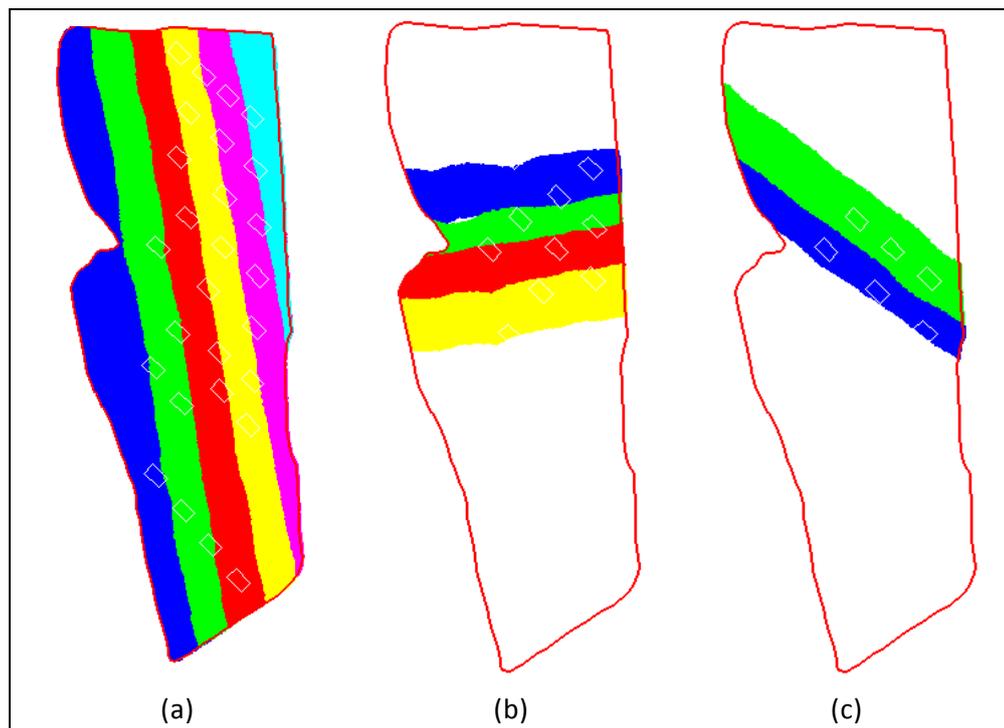


FIGURA 3.5 – DIFERENTES DIREÇÕES DE VOO REALIZADAS NO TALHÃO B UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I: FAIXAS LONGITUDINAIS (a) FAIXAS TRANSVERSAIS (b) FAIXAS INCLINADAS (c)

A coleta dos dados brutos foi realizada no período de 14 a 28 de agosto de 2009, tendo sido necessários 5 dias úteis de voo. Logo após a coleta, foi conduzido o processamento básico dos dados para obtenção das coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) do primeiro e último retorno para cada pulso laser emitido. O processamento básico envolve o processamento da trajetória para determinação do posicionamento e orientação do sensor e a combinação destes com os dados de ângulo instantâneo, alcance e parâmetros de calibração do sistema, obtendo desta forma as coordenadas tridimensionais dos pontos. Para o processamento da trajetória foi utilizado o *software PosPac* (Applanix) e para o processamento da nuvem de pontos o *software Realm Survey Suite* (Optech).

Os parâmetros de calibração utilizados no processamento dos dados foram obtidos através de um procedimento de calibração tradicional recomendado pelo fabricante do sistema para o equipamento ALTM 2050. O procedimento de calibração consta de testes aerotransportados realizados sobre áreas com pontos de controle previamente levantados através de técnicas

convencionais com o objetivo de determinar parâmetros para correção de erros sistemáticos nas observações e parâmetros de montagem do sistema. Para maiores detalhes sobre o método tradicional de calibração utilizado e a sua comparação com métodos modernos de calibração podem ser encontrados em Kersting *et al.* (2013).

3.2.1.2 Dados de Campo

3.2.1.2.1 Inventário Florestal

Os objetivos de um Inventário Florestal são estabelecidos de acordo com a utilização da área, que pode ter várias finalidades. A área pode ser de recreação, reserva florestal, área de manutenção da vida silvestre, áreas de reflorestamento comercial, entre outros.

No caso do reflorestamento comercial, o inventário florestal visa principalmente à estimativa das variáveis quantitativas como altura e volume, e variáveis qualitativas relativas à sanidade da árvore. Assim, pode-se estimar o potencial de crescimento florestal e a quantidade de madeira a ser retirada da área pré-estabelecida (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1997).

O inventário florestal dos talhões em estudo foi realizado pela KLABIN S/A, a qual disponibilizou os dados para esta pesquisa. Os dados de campo foram levantados no período de 24 de novembro a 10 de dezembro de 2009. Foram instaladas parcelas retangulares de dimensões de 25m x 12,5m totalizando 312,5 m², contendo 50 árvores conforme esquematizado na Figura 3.6. Em cada parcela amostral as árvores foram numeradas de 1 a 50 seguindo o sentido de caminhamento.

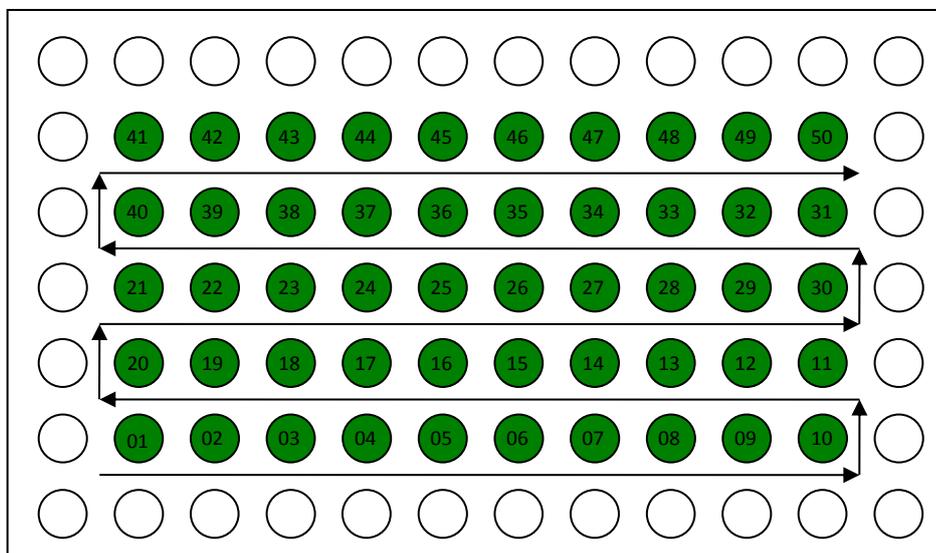


FIGURA 3.6 – COLETA DE DADOS NAS PARCELAS: ESQUEMA DO LEVANTAMENTO DA PARCELA

No percorrer de cada parcela instalada foram medidas as circunferências na altura do peito (CAP) de cada árvore e atribuídos códigos de qualidade e sanidade (os códigos utilizados são os descritos na Tabela 3.5). Para a medição da CAP foi empregada trena de lona (Figura 3.7).



FIGURA 3.7 – MEDIÇÃO DO CAP UTILIZANDO TRENA DE LONA

TABELA 3.5 – CÓDIGOS DE QUALIDADE E SANIDADE ATRIBUÍDOS PARA CADA ÁRVORE DA PARCELA AMOSTRAL

| Código | Descrição |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| A | Árvore bifurcada acima de 1,30 m de altura (DAP – diâmetro à altura do peito); |
| B | Árvore bifurcada abaixo de 1,30 m; |
| D | Árvore dominada, de pequenas dimensões ou de replantio tardio; |
| F | Falha de plantio; |
| J | Árvore atacada por macaco-prego parcialmente descascada (pode se recuperar); |
| K | Árvore atacada por macaco-prego totalmente anelada (não irá se recuperar); |
| N | Árvore morta por macaco-prego; |
| T | Árvore torta; |
| V | Árvore inclinada pelo vento. |

Seguindo a metodologia em uso corrente pela maioria das empresas responsáveis por inventários florestais, as 10 (dez) primeiras árvores de cada parcela foram medidas as alturas das árvores com o auxílio de uma trena a laser e um hipsômetro (Figura 3.8). A trena a laser foi utilizada para a medição da distância horizontal de um ponto de referência até a árvore, distância esta que deverá ser superior à altura da árvore a ser medida (escalas de distâncias de 15, 20, 30 ou 40 metros). Para a obtenção da altura das demais árvores da parcela utilizou-se da equação hipsométrica (Equação 3.1) a qual foi ajustada a partir dos dados de altura e DAP (CAP medida e convertida em DAP).



FIGURA 3.8 – TRENA LASER E HIPSÔMETRO UTILIZADOS

$$h = e^{\{\beta_0 + \beta_1(\ln[DAP])\}} \quad (3.1)$$

onde:

h : altura da árvore.

DAP : diâmetro a altura do peito ($DAP = CAP/\pi$).

β_0 e β_1 : coeficientes estimados.

Os coeficientes das equações hipsométricas para os talhões A, B e C fornecidos pela KLABIN S/A são apresentados na Tabela 3.6.

TABELA 3.6 – COEFICIENTES DAS EQUACÕES HIPSOMÉTRICAS

| Talhão | Coeficientes | |
|--------|---------------------|-------------------|
| | β_0 | β_1 |
| A | -0.0186772861333537 | 0.717389787620972 |
| B | 1.84698102166755 | 0.419971992178205 |
| C | 1.55836490169217 | 0.41820139832663 |

FONTE: KLABIN S/A

Além das equações hipsométricas a KLABIN S/A também disponibilizou as equações biométricas para os diferentes talhões na forma mostrada na Equação 3.2.

Os coeficientes das equações biométricas para os talhões A, B e C são apresentados na Tabela 3.7.

$$V = e^{\{\beta_0 + \beta_1(\ln[DAP]) + \beta_2(\ln[h])\}} \quad (3.2)$$

onde:

V : volume individual;

β_0 , β_1 e β_2 : coeficientes do modelo.

TABELA 3.7 – COEFICIENTES DAS EQUACÕES BIOMÉTRICAS

| Talhão | Coeficientes | | |
|--------|--------------|-----------|-----------|
| | β_0 | β_1 | β_2 |
| A | -11.552676 | 2.303053 | 1.095855 |
| B | -11.9053985 | 2.4101033 | 1.1465468 |
| C | -10.305408 | 2.107059 | 0.868905 |

FONTE: KLABIN S/A

A Figura 3.9 ilustra a localização das parcelas que foram instaladas nos talhões de estudo. No Talhão A (*Pinus taeda* – 2004) foram instaladas 14 parcelas, no Talhão B (*Eucalyptus* Híbrido – 2006) 27 parcelas e no Talhão C (*Pinus taeda* – 1997) 19 parcelas. As Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10 apresentam os resultados do inventário por parcela amostral, para os talhões A, B e C, respectivamente.

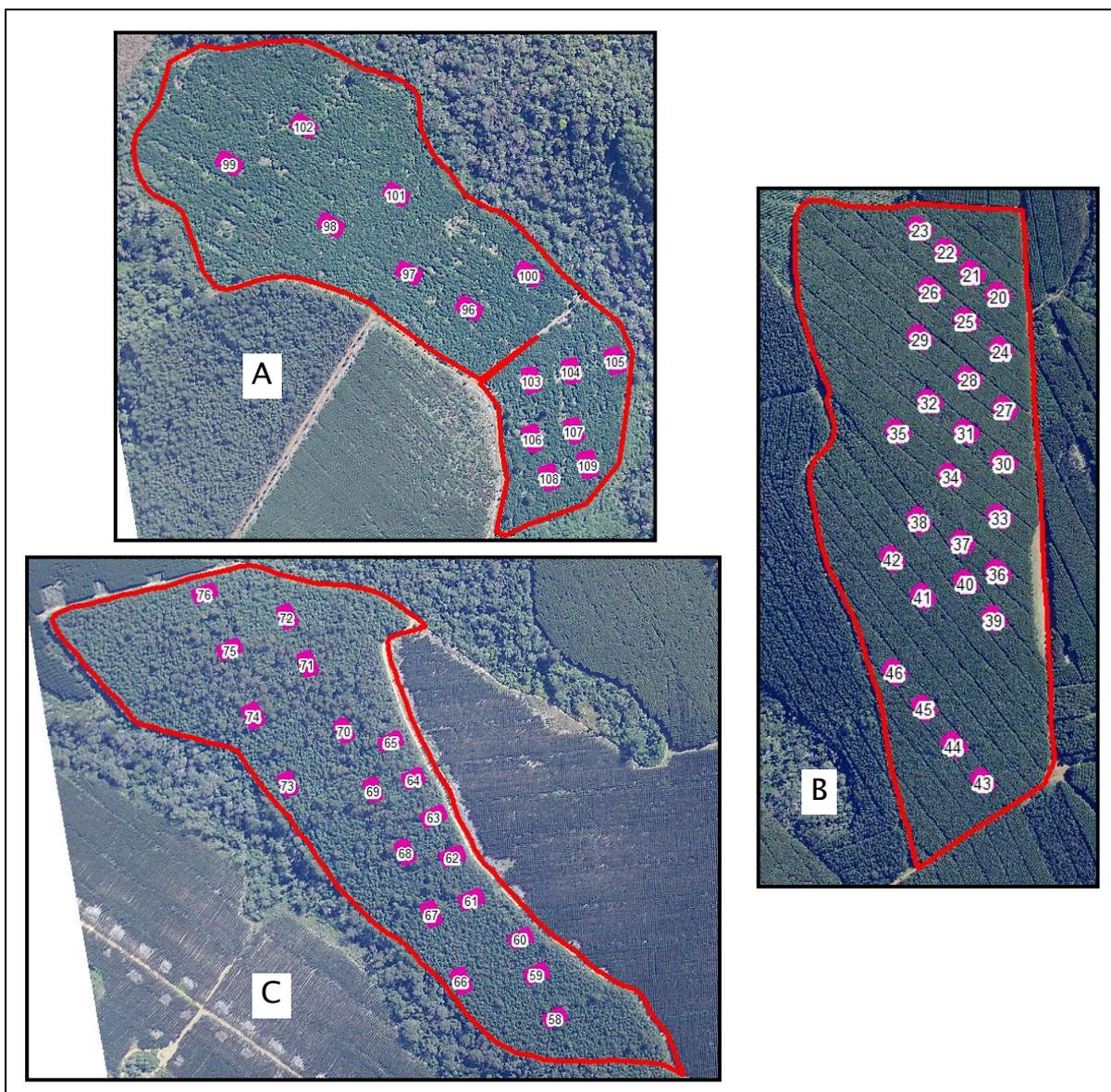


FIGURA 3.9 – PARCELAS INSTALADAS NOS TALHÕES A, B E C

TABELA 3.8 – INVENTÁRIO *Pinus taeda* (2004)

| Parcela | Área Parcela (m ²) | DAP Médio (cm) | Altura Média (m) | Volume/Parcela (m ³ com casca) | Nº Árvores/Parcela | Árvores/ha | Volume/ha (m ³ com casca) | Altura Dominante (m) |
|---------|--------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|------------|--------------------------------------|----------------------|
| 96 | 328,90 | 16,92 | 7,42 | 2,69 | 42 | 1,277 | 81,69 | 9,00 |
| 97 | 330,12 | 15,29 | 6,79 | 1,94 | 40 | 1,212 | 58,90 | 8,61 |
| 98 | 325,12 | 16,17 | 7,20 | 2,20 | 41 | 1,261 | 67,56 | 8,33 |
| 99 | 318,78 | 15,49 | 6,96 | 2,10 | 39 | 1,223 | 65,73 | 8,64 |
| 100 | 312,42 | 16,54 | 7,32 | 2,17 | 36 | 1,152 | 69,35 | 8,72 |
| 101 | 313,75 | 15,37 | 7,04 | 2,18 | 44 | 1,402 | 69,51 | 8,31 |
| 102 | 318,77 | 17,09 | 7,51 | 2,34 | 35 | 1,098 | 73,52 | 9,07 |
| 103 | 313,72 | 15,43 | 9,28 | 2,58 | 39 | 1,243 | 82,12 | 10,41 |
| 104 | 332,64 | 16,28 | 9,42 | 2,19 | 28 | 842 | 65,94 | 10,70 |
| 105 | 311,24 | 15,48 | 9,14 | 2,89 | 44 | 1,414 | 92,86 | 10,34 |
| 106 | 317,52 | 15,14 | 9,03 | 2,89 | 47 | 1,480 | 90,99 | 10,48 |
| 107 | 309,96 | 14,72 | 8,94 | 2,73 | 48 | 1,549 | 88,12 | 10,25 |
| 108 | 320,95 | 16,18 | 9,39 | 2,79 | 39 | 1,215 | 86,96 | 10,41 |
| 109 | 333,96 | 16,47 | 9,31 | 3,15 | 41 | 1,228 | 94,45 | 10,73 |

TABELA 3.9 – INVENTÁRIO *Eucalyptus* HÍBRIDO (2006)

| Parcela | Area Parcela (m ²) | DAP Médio (cm) | Altura Média (m) | Volume/Parcela (m ³ com casca) | Nº Árvores/Parcela | Árvores/ha | Volume/ha (m ³ com casca) | Altura Dominante (m) |
|---------|--------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|------------|--------------------------------------|----------------------|
| 20 | 377,91 | 14,53 | 19,35 | 6,31 | 48 | 1.270 | 166,97 | 20,80 |
| 21 | 377,91 | 14,52 | 19,62 | 6,49 | 49 | 1.297 | 171,83 | 21,48 |
| 22 | 379,23 | 14,53 | 19,40 | 6,15 | 47 | 1.239 | 162,24 | 20,75 |
| 23 | 380,00 | 14,47 | 19,62 | 6,43 | 49 | 1.289 | 169,22 | 21,39 |
| 24 | 366,00 | 14,15 | 19,19 | 6,19 | 50 | 1.366 | 169,00 | 21,73 |
| 25 | 382,03 | 13,43 | 18,83 | 5,71 | 50 | 1.309 | 149,40 | 21,38 |
| 26 | 385,05 | 14,60 | 19,75 | 6,41 | 47 | 1.221 | 166,34 | 21,55 |
| 27 | 367,84 | 14,07 | 19,32 | 5,69 | 47 | 1.278 | 154,57 | 20,27 |
| 28 | 350,35 | 13,78 | 19,08 | 5,53 | 49 | 1.399 | 157,76 | 20,63 |
| 29 | 369,95 | 14,21 | 19,31 | 6,07 | 50 | 1.352 | 164,01 | 20,14 |
| 30 | 368,52 | 14,14 | 19,32 | 6,25 | 51 | 1.384 | 169,71 | 20,70 |
| 31 | 371,01 | 14,58 | 19,75 | 6,29 | 47 | 1.267 | 169,66 | 21,55 |
| 32 | 367,04 | 13,90 | 19,31 | 5,95 | 50 | 1.362 | 162,12 | 21,55 |
| 33 | 372,50 | 14,10 | 19,22 | 5,89 | 49 | 1.315 | 158,09 | 20,06 |
| 34 | 354,64 | 14,51 | 19,41 | 6,07 | 47 | 1.325 | 171,13 | 20,49 |
| 35 | 351,78 | 14,10 | 19,13 | 5,80 | 49 | 1.393 | 165,01 | 20,18 |
| 36 | 358,93 | 14,51 | 19,50 | 6,55 | 50 | 1.393 | 182,46 | 20,81 |
| 37 | 367,92 | 14,87 | 19,75 | 6,72 | 48 | 1.305 | 182,74 | 21,25 |
| 38 | 361,44 | 14,50 | 19,44 | 6,30 | 48 | 1.328 | 174,24 | 20,69 |
| 39 | 359,55 | 14,13 | 19,06 | 6,13 | 51 | 1.418 | 170,55 | 20,40 |
| 40 | 366,03 | 13,98 | 18,91 | 5,99 | 50 | 1.366 | 163,57 | 20,95 |
| 41 | 355,32 | 14,50 | 19,46 | 6,59 | 50 | 1.407 | 185,55 | 20,98 |
| 42 | 345,80 | 14,47 | 19,08 | 6,22 | 49 | 1.417 | 179,79 | 20,44 |
| 43 | 379,01 | 14,81 | 19,52 | 6,92 | 50 | 1.319 | 182,63 | 20,89 |
| 44 | 395,20 | 14,70 | 18,96 | 6,37 | 48 | 1.215 | 161,15 | 20,70 |
| 45 | 361,62 | 14,32 | 19,27 | 6,19 | 49 | 1.355 | 171,24 | 20,77 |
| 46 | 372,50 | 14,28 | 18,84 | 5,51 | 46 | 1.235 | 147,99 | 20,18 |

TABELA 3.10 – INVENTÁRIO *Pinus Taeda* (1997)

| Parcela | Area Parcela (m ²) | DAP Médio (cm) | Altura Média (m) | Volume/Parcela (m ³ com casca) | Nº Árvores/Parcela | Árvores/ha | Volume/ha (m ³ com casca) | Altura Dominante (m) |
|---------|--------------------------------|----------------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|------------|--------------------------------------|----------------------|
| 58 | 302,58 | 20,91 | 16,99 | 9,37 | 37 | 1.223 | 309,83 | 19,82 |
| 59 | 305,04 | 21,17 | 17,02 | 10,96 | 42 | 1.377 | 359,35 | 19,21 |
| 60 | 305,04 | 20,03 | 16,47 | 9,20 | 39 | 1.279 | 301,57 | 19,68 |
| 61 | 308,75 | 20,52 | 16,79 | 9,75 | 40 | 1.296 | 315,94 | 19,73 |
| 62 | 310,00 | 21,09 | 16,55 | 9,40 | 37 | 1.194 | 303,19 | 19,50 |
| 63 | 307,44 | 20,95 | 15,94 | 6,29 | 26 | 846 | 204,65 | 18,67 |
| 64 | 302,50 | 20,69 | 16,75 | 6,39 | 26 | 860 | 211,10 | 19,05 |
| 65 | 278,46 | 19,38 | 16,33 | 5,28 | 23 | 826 | 189,58 | 19,50 |
| 66 | 327,66 | 22,94 | 16,77 | 12,09 | 38 | 1.160 | 369,06 | 20,26 |
| 67 | 321,28 | 20,96 | 15,26 | 10,30 | 42 | 1.307 | 320,63 | 19,54 |
| 68 | 303,75 | 18,29 | 15,57 | 7,41 | 38 | 1.251 | 243,98 | 19,30 |
| 69 | 298,45 | 18,70 | 15,64 | 5,61 | 29 | 972 | 188,11 | 18,35 |
| 70 | 321,21 | 19,65 | 16,51 | 6,18 | 27 | 841 | 192,38 | 19,57 |
| 71 | 310,97 | 19,54 | 16,17 | 7,47 | 33 | 1.061 | 240,21 | 19,75 |
| 72 | 336,60 | 22,29 | 16,53 | 9,30 | 32 | 951 | 276,32 | 20,08 |
| 73 | 301,20 | 25,80 | 17,37 | 8,35 | 20 | 664 | 277,10 | 20,87 |
| 74 | 290,36 | 20,44 | 15,66 | 5,43 | 24 | 827 | 187,14 | 18,48 |
| 75 | 298,84 | 19,03 | 15,47 | 5,81 | 30 | 1.004 | 194,44 | 18,89 |
| 76 | 303,78 | 22,46 | 16,37 | 9,39 | 28 | 922 | 308,99 | 20,66 |

3.2.1.2.2 Levantamento Topográfico

Após acompanhamento da amostragem do inventário florestal realizada pela KLABIN S/A, foi realizado o levantamento topográfico, que teve como objetivos:

- Georreferenciar as informações do inventário visando possibilitar correspondência com os dados do LIDAR e portanto comparação entre as variáveis florestais extraídas dos dados do LIDAR e os dados do inventário.
- Obter pontos de controle no terreno para verificação da acurácia dos modelos digitais de terreno derivados a partir dos dados do LIDAR.

Três árvores posicionadas nos cantos de cada parcela foram georreferenciadas (árvores com numeração 01, 10, 41 ou 50) (Figura 3.6). A correspondência entre as demais árvores da parcela com os dados do inventário foi determinada pelo sentido de caminhamento utilizado na parcela amostragem do inventário. Foram levantados em média 20 pontos de controle de terreno no interior de cada parcela distribuídos de forma homogênea.

O apoio topográfico foi efetuado através de poligonais orientadas por pontos levantados por receptores GPS. Esses pontos foram rastreados externamente a cada talhão, sendo 2 pontos por talhão. Dependendo do talhão, a poligonal foi enquadrada ou fechada, eventualmente poligonal aberta.

No levantamento topográfico foi utilizado um receptor de dupla frequência de sinais de satélites NAVSTAR-GPS (*Navigation with Time and Ranging – Global Position System*) SYSTEM 500 da marca LEICA Geosystems (Figura 3.10a) e uma estação total GPT-3007W com precisão nominal de 7" e leitura mínima de 10" na medição de ângulos e 3mm + 2ppm x D (Medida da distância em mm), GPS-3007W, TRIMBLE (Figura 3.10b).

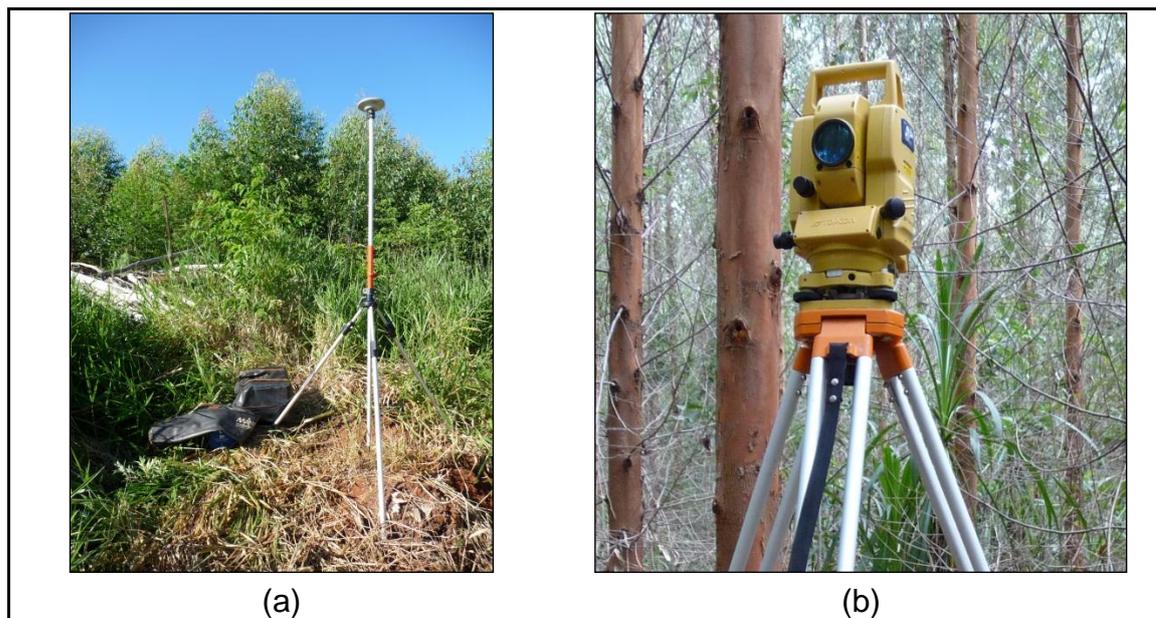


FIGURA 3.10 – RECEPTOR GPS (a) E ESTAÇÃO TOTAL (b) UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Para obter as coordenadas dos pontos de apoio, foram realizados transportes de coordenadas usando o método de posicionamento relativo estático a partir das bases da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). As bases mais próximas da área (Telêmaco Borba) na época dos levantamentos eram UFPR (Curitiba), PRMA (Maringá) e PRGU (Guarapuava), distando 200 km, 160 km e 150 km, respectivamente. Como todas as linhas de base são maiores que 100 km, a recomendação do IBGE é a de que se ocupem os pontos cujas coordenadas se deseja determinar por no mínimo 4 horas para locais com condições favoráveis. Isto é, os dados têm que ser coletados de forma contínua, sem perdas de ciclo (descontinuidade na medida da fase da portadora, resultante de uma perda temporária do rastreamento da portadora de um receptor GPS), sem multicaminho, sem abalar a estrutura da antena e seguindo o manual do equipamento.

No entanto, por se tratar de uma floresta, as condições não são favoráveis para levantamento com GPS. Alguns talhões possuem árvores que ultrapassam os 40 m de altura. Desta forma, os locais onde foram alocados os pontos de apoio foram escolhidos de forma que o horizonte da antena não fosse tão prejudicado pelas árvores. Para tal, foram escolhidas as encruzilhadas, caminhos e divisores de talhão por apresentarem um maior horizonte visível.

As altitudes geométricas dos pontos de apoio topográfico foram transportadas até as árvores através das poligonais utilizando nivelamento trigonométrico.

3.2.2 Classificação dos Dados do LIDAR

Conforme descrito no item 2.1.4, o algoritmo utilizado para classificação dos pontos de terreno é um dos fatores que influi na acurácia final do modelo digital de terreno gerado. Vale também ressaltar que a qualidade da determinação da altura das árvores e por consequência do volume são afetadas pela acurácia do modelo de terreno uma vez que a informação de altura é obtida através da subtração da altitude do topo da árvore e a altitude de sua projeção no terreno.

Neste trabalho foi utilizado o algoritmo de densificação progressiva (AXELSSON, 2000) disponível no software *TerraScan* do fornecedor Terrasolid. Este algoritmo tem sido vastamente utilizado no meio científico (KAARTINEN *et al.* 2012; ZANDONA, 2006; MACEDO, 2009) e comercial com resultados satisfatórios.

Para classificação dos pontos de terreno são utilizados os dados do último retorno. O algoritmo de classificação consiste na construção de um modelo de triangulação (TIN) de maneira iterativa. O modelo inicial é gerado a partir da seleção dos pontos mais baixos dentro de uma janela de classificação de dimensão tal que garanta que pelo menos um ponto dentro desse entorno tenha atingido o terreno. Para regiões urbanas, por exemplo, deve-se utilizar o tamanho da maior edificação. O modelo inicialmente construído é refinado iterativamente a partir da adição de pontos que satisfaçam parâmetros de iteração definidos pelo usuário. Os parâmetros de iteração definem o quão próximo o ponto em análise deve estar do plano do triângulo para que este possa ser incluído no modelo. Os parâmetros de iteração são descritos a seguir e ilustrados na Figura 3.11.

- **Ângulo de Iteração:** ângulo máximo que pode ser formado pelo ponto em análise, sua projeção no plano do TIN e o respectivo vértice mais próximo.

- **Distância de Iteração:** distância entre o ponto em análise e sua projeção no plano do TIN.
- **Declividade do Terreno:** declividade máxima que o modelo de terreno pode atingir.

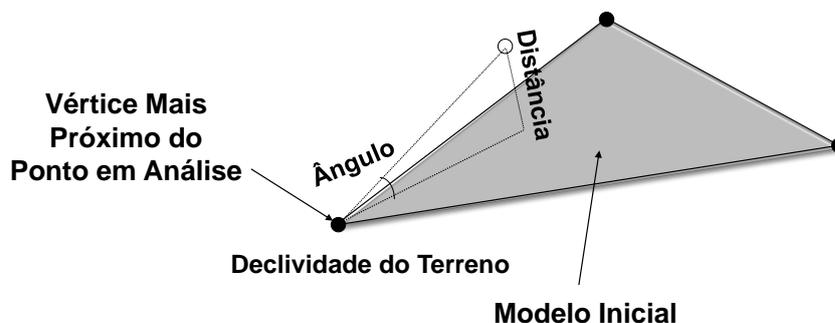


FIGURA 3.11 – PARÂMETROS DE ITERAÇÃO DO MÉTODO DE DENSIFICAÇÃO PROGRESSIVA

3.2.3 Avaliação da Exatidão dos Modelos Digitais de Terreno Obtidos a Partir dos Dados do LIDAR

A exatidão de um MDT derivado a partir dos dados do LIDAR dependerá de diversos fatores como a acurácia dos pontos mapeados, a densidade e distribuição espacial dos pontos no terreno, o tipo de cobertura/características do terreno, algoritmo utilizado para classificação dos pontos de terreno e o método de interpolação empregado na geração do modelo. Este trabalho de pesquisa tem por objetivo avaliar a exatidão de MDTs derivados dos dados do LIDAR coletados utilizando diferentes configurações de voo sobre áreas com diferentes espécies de florestas plantadas. As diferentes configurações de voo irão resultar em diferentes densidades de pontos cuja penetração no terreno e distribuição espacial irá depender não somente da configuração utilizada como também das características da vegetação (p.ex., densidade de copa). Para todos os cenários investigados o algoritmo de densificação progressiva de um TIN será utilizado (conforme descrito no item 3.2.2) e para interpolação do modelo será utilizada triangulação Delaunay (TIN).

A acurácia da nuvem de pontos proveniente de um sistema LIDAR depende de erros sistemáticos e aleatórios nas observações e parâmetros do sistema. A magnitude dos erros aleatórios depende principalmente da precisão

das observações do sistema tais como posição e orientação da plataforma, ângulos e alcances medidos. Os erros sistemáticos nos parâmetros do sistema são geralmente determinados no procedimento de calibração. Neste trabalho foi adotado método de calibração tradicional recomendado pelo fabricante do sistema (consultar Kersting *et al.* (2013) para detalhes). Erros sistemáticos na nuvem de pontos não eliminados no processo de calibração são devidos principalmente a erros na trajetória do sensor proveniente do processo de integração GNSS/INS (HABIB *et al.* 2009b; HABIB *et al.* 2009c). Diferentemente dos erros nos parâmetros de calibração, que são erros globais, os erros na trajetória são locais, ou seja, se traduzem em parâmetros de transformação locais que variam para as diferentes faixas coletadas. Para quantificação desses erros bem como para ajuste das faixas visando geração de um modelo de terreno homogêneo, o método de ajustamento de faixas foi utilizado. Tal método também foi utilizado para quantificação dos erros sistemáticos entre os dados do LIDAR e a informação de controle (obtida através de levantamento topográfico convencional). Uma vez removidos os erros sistemáticos, a exatidão do modelo de terreno foi então avaliada. O procedimento adotado é detalhado na sequência.

3.2.3.1 Ajustamento de Faixas

O objetivo da utilização de um método de ajustamento de faixas neste trabalho é o de remover discrepâncias sistemáticas entre as faixas adjacentes causados por erros sistemáticos na trajetória do sensor, assumindo que erros sistemáticos nos parâmetros do sistema foram removidos no processo de calibração. Neste trabalho as discrepâncias (parâmetros de transformação) consideradas entre faixas são três deslocamentos (X_T , Y_T , Z_T). Objetiva-se produzir modelo homogêneo através do aumento da compatibilidade entre faixas adjacentes.

O método de ajustamento de faixas utilizado neste trabalho foi o proposto em Kersting *et al.* (2008) e Habib *et al.* (2009a). Devido à natureza irregular da nuvem de pontos do LIDAR, sabe-se que não é possível a identificação de pontos homólogos em faixas sobrepostas e, portanto, primitivas de ordem maior

devem ser utilizadas. Em Kersting *et al.* (2008) e Habib *et al.* (2009a), feições lineares e planos segmentados foram utilizados como primitivas. A utilização de tais primitivas foi possibilitada pelo fato dos dados terem sido coletadas em região urbana. No presente trabalho, como se trata de região com cobertura florestal (ausência de superfícies físicas como telhados de edificações) teve-se que filtrar os dados previamente ao ajustamento (considerar apenas os pontos na superfície do terreno) e utilizar primitivas passíveis de serem extraídas. Para tanto, utilizou-se como primitivas pontos e planos de um TIN homólogos (uma das faixas é representada por pontos e a outra por um TIN) onde a correspondência entre feições homólogas é automaticamente estabelecida através do método ICPatch - *Iterative Closest Patch* (HABIB *et al.*, 2009b e HABIB *et al.*, 2010).

Como ilustra a Figura 3.12, se o ponto q_i da superfície (faixa) S_2 pertence ao plano do TIN S_p representado pelos vértices S_{p_a} , S_{p_b} e S_{p_c} da faixa S_1 , então esse ponto deve coincidir com o plano do TIN na ausência de erros sistemáticos. Na presença de erros sistemáticos, discrepâncias existirão entre o ponto e o plano correspondente. O método apresentado em HABIB *et al.*, 2009b, estima os parâmetros de transformação que minimizam essa discrepância. Após a aplicação dos parâmetros de transformação (as discrepâncias estimadas), o volume da pirâmide cujos vértices são q_i' , S_{p_a} , S_{p_b} e S_{p_c} deve ser zero. Essa injunção de volume é matematicamente expressa através da Equação 3.3. Através da utilização de múltiplos pares de pontos e planos conjugados, pode-se estimar os parâmetros de transformação que satisfaçam essa injunção de volume. A solução do ajustamento após linearização mostrada na Equação 3.4 pode ser obtida através da Equação 3.5. Para estimação confiável dos parâmetros de transformação (discrepâncias), os planos utilizados devem possuir diferentes inclinações e aspecto.

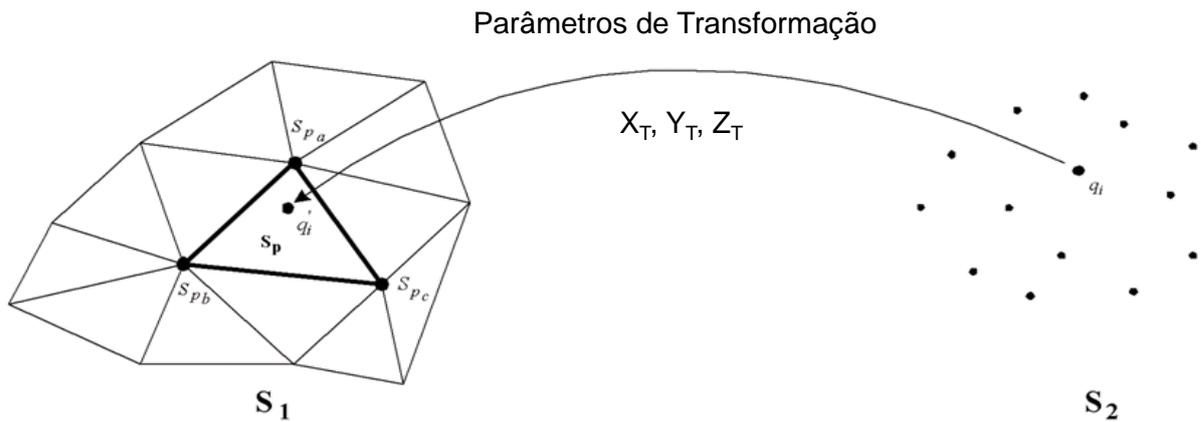


FIGURA 3.12 – BASE CONCEITUAL DO PROCEDIMENTO DE CORRESPONDÊNCIA PONTO-PLANO UTILIZADO (ADAPTADO DE HABIB *et al.*, 2010a)

$$\begin{vmatrix} X_{q'_i} & Y_{q'_i} & Z_{q'_i} & 1 \\ X_{p_a} & Y_{p_a} & Z_{p_a} & 1 \\ X_{p_b} & Y_{p_b} & Z_{p_b} & 1 \\ X_{p_c} & Y_{p_c} & Z_{p_c} & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.3)$$

onde,

$$\begin{bmatrix} X_{q'_i} \\ Y_{q'_i} \\ Z_{q'_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{q_i} \\ Y_{q_i} \\ Z_{q_i} \end{bmatrix}$$

$$w = A x + B e \quad e \sim (0, \Sigma_Y) \quad (3.4)$$

onde,

- x vetor de correções aos valores aproximados das incógnitas (X_T, Y_T, Z_T) ,
- A matriz das derivadas parciais com relação às incógnitas,
- B matriz das derivadas parciais com relação às observações,
- w é o determinante estimado utilizando os valores aproximados das incógnitas e as observações (coordenadas dos pontos), e
- Σ_Y matriz variância-covariância a-priori das observações (coordenadas dos pontos).

$$\hat{x} = [A^T (B \Sigma_Y B^T)^{-1} A]^{-1} A^T (B \Sigma_Y B^T)^{-1} w$$

$$B \tilde{e} = w - A \hat{x}$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \tilde{e}^T B^T (B \Sigma_Y B^T)^{-1} B \tilde{e} / \text{redundancy} \rightarrow \text{aposteriori variance factor} \quad (3.5)$$

$$\tilde{\Sigma}_Y = \hat{\sigma}_o^2 \Sigma_Y \rightarrow \text{aposteriori variance-covariance matrix of the point cloud coordinates}$$

Conforme já mencionado, a correspondência entre pontos da faixa S_2 e planos da faixa S_1 é realizada de forma automática. Mais especificamente, a correspondência é estabelecida através de procedimento iterativo denominado ICPatch - *Iterative Closest Patch* (HABIB *et al.*, 2009b e HABIB *et al.*, 2010).

Para ajustamento das faixas, uma das faixas (geralmente uma faixa intermediária) é selecionada como referência, sendo as demais faixas ajustadas de forma a se tornarem compatíveis com a faixa de referência (Figura 3.13). Diferentemente do procedimento realizado em Kersting *et al.* (2008) e Habib *et al.* (2009a), neste trabalho não foi realizado ajustamento simultâneo das faixas. Mais especificamente, as faixas foram ajustadas sequencialmente iniciando-se com o ajuste das faixas sobrepostas à faixa de referência. Na sequência as faixas ajustadas são utilizadas como referência. Esse procedimento é repetido até que todas as faixas do bloco sejam ajustadas.

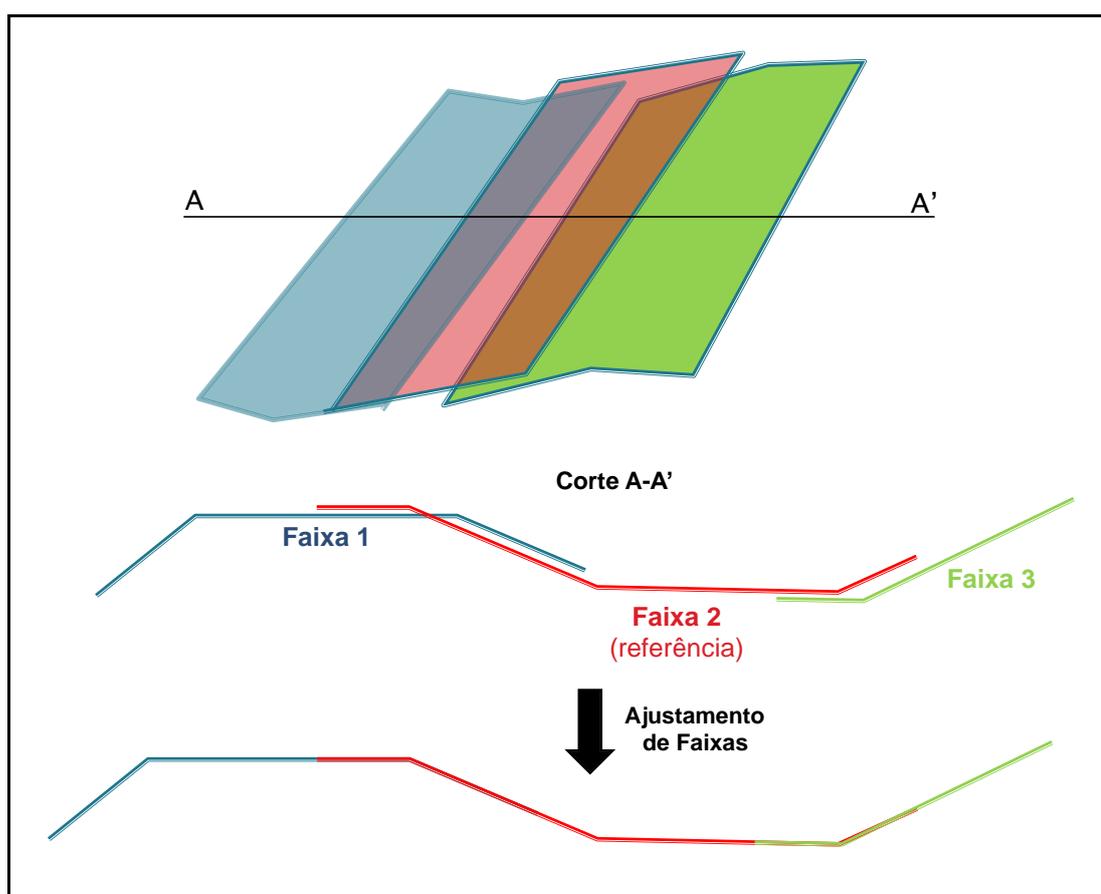


FIGURA 3.13 – AJUSTAMENTO DE FAIXAS

3.2.3.2 Avaliação da Exatidão dos Modelos Digitais de Terreno

Para avaliação dos erros sistemáticos entre os dados do LIDAR ajustados e a informação de controle (Figura 3.14) foi utilizado o mesmo procedimento descrito no item anterior. As discrepâncias consideradas também foram três deslocamentos (X_T , Y_T , Z_T).

Após a avaliação das discrepâncias e, portanto adequado o registro entre o modelo de terreno proveniente do LIDAR e a informação de controle, a exatidão altimétrica do modelo (interpolado utilizando triangulação Delaunay) foi obtida a partir da Equação 3.6.

$$REM_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_{controle} - Z_{modelo})^2}{N}} \quad (3.6)$$

onde:

$Z_{controle}$: Altitude do ponto de controle

Z_{modelo} : Altitude do ponto correspondente no modelo de terreno derivado do LIDAR

N : Número de pontos de controle

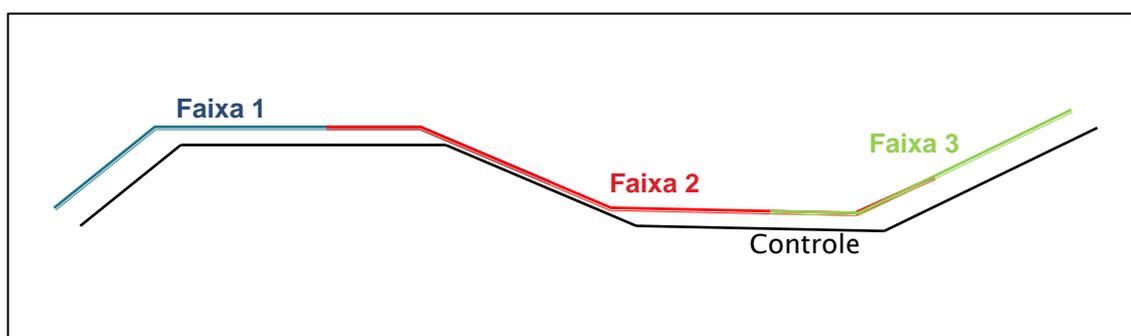


FIGURA 3.14 – DISCREPÂNCIAS ENTRE O MDT GERADO E A INFORMAÇÃO DE CONTROLE

3.2.4 Obtenção de Variáveis Florestais

Conforme descrito anteriormente, existem duas abordagens utilizadas para a extração de variáveis florestais a partir dos dados do LIDAR. Uma primeira abordagem, denominada neste trabalho de “Abordagem em Nível de Parcela Amostral”, visa à obtenção de variáveis florestais a partir da utilização de dados de distribuição da altura do dossel de parcelas amostrais extraídos dos

dados do LIDAR. Uma segunda abordagem, denominada neste trabalho de “Abordagem em Nível de Árvore Individual” visa à obtenção de variáveis florestais a partir de dados de árvores individuais extraídos dos dados do LIDAR.

O objetivo geral desta pesquisa é a análise do impacto da utilização de diferentes configurações de voo na aquisição dos dados do LIDAR na obtenção de variáveis florestais. Esta análise foi conduzida para as duas abordagens. A forma como as duas abordagens foram implementadas neste trabalho está descrita na sequência.

3.2.4.1 Abordagem em Nível de Parcela Amostral

Na Abordagem em Nível de Parcela Amostral, as variáveis florestais como altura média, diâmetro médio, área basal e volume são estimadas a partir de dados de distribuição de altura do dossel extraídos dos dados do LIDAR por parcela amostral (Equação 3.7).

$$y = f(h_1, h_2, h_3, h_4 \dots) \quad (3.7)$$

onde:

y : variável florestal de interesse – variável dependente (ex.: altura média, diâmetro médio, área basal, volume);

f : função que relaciona os dados de distribuição da altura do dossel e a variável florestal de interesse;

$h_1, h_2, h_3, h_4 \dots$: dados de distribuição da altura do dossel (ex.: altura média, 10º percentil, 30º percentil).

Para fins de construção/ajuste dos modelos, as variáveis florestais foram obtidas do inventário florestal fornecidos pela empresa KLABIN S/A. A Tabela 3.11 ilustra as variáveis florestais utilizadas neste trabalho.

TABELA 3.11 – VARIÁVEIS FLORESTAIS PROVENIENTES DO INVENTÁRIO FLORESTAL PARA FINS DE CONSTRUÇÃO DOS MODELOS (VARIÁVEIS DEPENDENTES)

| Variáveis Dependentes | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------|----------|-----------|---------|
| Descrição | Natural | Transformadas | | | |
| | | Quadrado | Raiz | Logaritmo | Inverso |
| Diâmetro Médio: Obtido através do cálculo da média dos diâmetros de todas das árvores da parcela amostral | DM | DM ² | DM_sqrt | DM_ln | DM_inv |
| Altura Média: Obtida através do cálculo da média das alturas de todas as árvores da parcela amostral | HM | HM ² | HM_sqrt | HM_ln | HM_inv |
| Volume/ha: Obtido através de modelos biométricos pré-estabelecidos pela empresa em questão. O volume é expresso por ha. | VOL | VOL ² | VOL_sqrt | VOL_ln | VOL_inv |

Os dados extraídos da nuvem de pontos do LIDAR visando a caracterização da distribuição da altura do dossel (variáveis independentes), conforme mencionado anteriormente, geralmente incluem diferentes percentis de altura, altura média, desvio padrão, altura máxima, densidade de copa para diferentes percentis (ou seja, proporção do número de pontos com altura acima de um determinado percentil pelo número total de pontos). Procedimentos semelhantes foram utilizados nos trabalhos de Magnussen e Boudewyn (1998); Mean *et al.* (2000); Naesset (1997); Naesset e Bjerknæs (2001); Naesset e Okland (2002); Nelson (1997); Nelson *et al.* (1988). As variáveis independentes consideradas neste trabalho são listadas na Tabela 3.12.

TABELA 3.12 – DADOS EXTRAÍDOS DA NUVEM DE PONTOS DO LIDAR (VARIÁVEIS INDEPENDENTES) E SUAS TRANSFORMADAS

| | | Variáveis Independentes | | | | |
|-------------------|----------------|-------------------------|----------------|--------------|--------------------|-----------|
| Descrição | Natural | Transformadas | | | | |
| | | Quadrado | Raiz | Logaritmo | Inverso | |
| Altura Média | f_Havg | f_Havg2 | f_Havg_sqrt | f_Havg_In | f_Havg_inv | |
| Desvio Padrão | f_Hdesvio | $f_{Hdesvio}^2$ | f_Hdesvio_sqrt | f_Hdesvio_In | $f_{Hdesvio}^{-1}$ | |
| 10 ° Percentil | f_h10 | f_h102 | f_h10_sqrt | f_h10_In | f_h10_inv | |
| 30 ° Percentil | f_h30 | f_h302 | f_h30_sqrt | f_h30_In | f_h30_inv | |
| 50 ° Percentil | f_h50 | f_h502 | f_h50_sqrt | f_h50_In | f_h50_inv | |
| 70 ° Percentil | f_h70 | f_h702 | f_h70_sqrt | f_h70_In | f_h70_inv | |
| 90 ° Percentil | f_h90 | f_h902 | f_h90_sqrt | f_h90_In | f_h90_inv | |
| Dens. de Copa: | 10 ° Percentil | p_h10 | p_h102 | p_h10_sqrt | p_h10_In | p_h10_inv |
| | 30 ° Percentil | p_h30 | p_h302 | p_h30_sqrt | p_h30_In | p_h30_inv |
| | 50 ° Percentil | p_h50 | p_h502 | p_h50_sqrt | p_h50_In | p_h50_inv |
| | 70 ° Percentil | p_h70 | p_h702 | p_h70_sqrt | p_h70_In | p_h70_inv |
| | 90 ° Percentil | p_h90 | p_h902 | p_h90_sqrt | p_h90_In | p_h90_inv |

Os dados listados na Tabela 3.12 foram extraídos dos dados do primeiro retorno do LIDAR. Primeiramente, a partir dos pontos do último retorno classificados como sendo de terreno foi gerado um MDT utilizando triangulação TIN. Em seguida, os pontos do primeiro retorno foram rebatidos no MDT para obtenção da altitude do terreno correspondente. Desta forma pôde-se obter a altura de cada ponto do primeiro retorno com relação ao terreno através da subtração da altitude do ponto e a respectiva altitude do terreno. Para derivação das variáveis independentes, apenas pontos do primeiro retorno com altura superior a 2 metros foram utilizados, visando remover a influência de pontos provenientes do terreno, arbustos e vegetação rasteira. Procedimento semelhante foi utilizado por Naesset (1997, 2002) e Zonete (2009). A Figura 3.15 ilustra a metodologia utilizada.

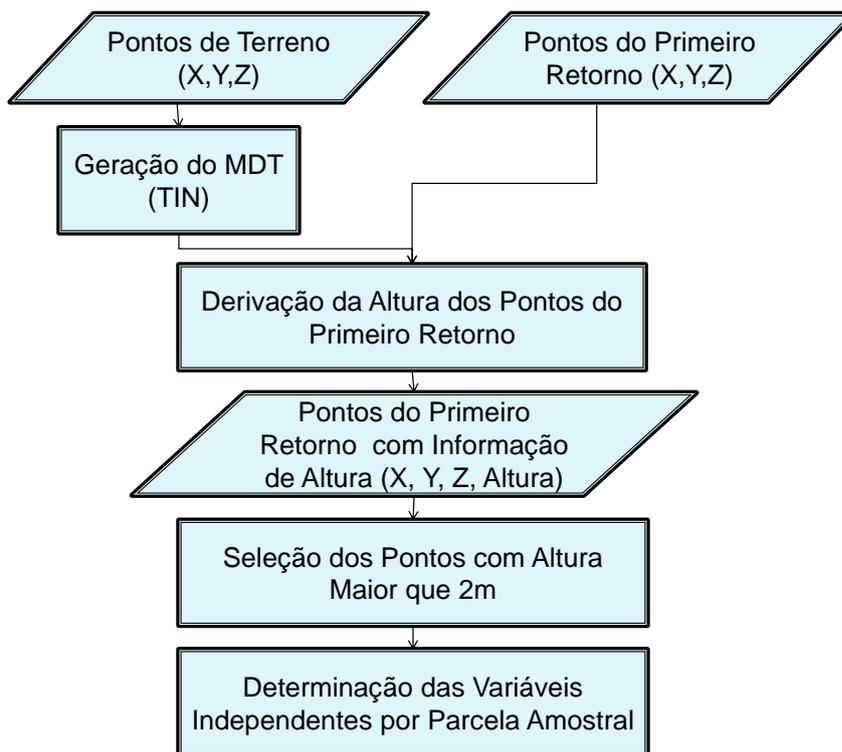


FIGURA 3.15 – METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DA NUVEM DE PONTOS CLASSIFICADA DO LIDAR

Para a seleção das variáveis independentes (dados de distribuição da altura do dossel extraídos dos dados do LIDAR) e construção/ajuste dos modelos foi utilizada a técnica *stepwise* (RIEGER *et al.*, 1999; MEANS *et al.*, 2000; NAESSET, 2002; ZONETE, 2009). A técnica *stepwise* consiste no estabelecimento sequencial de modelos (na forma mostrada na Equação 3.8) com crescente/decrescente número de variáveis independentes a partir da entrada ou saída de variáveis, de maneira que a qualidade do modelo é sucessivamente melhorada. As transformadas das variáveis dependentes e independentes também foram consideradas (quadrado, raiz, logaritmo natural, inverso) para determinação do modelo que proporcione melhor ajuste para os dados. A utilização de variáveis transformadas tem sido considerada por vários autores, como em Zonete (2009).

$$y = \beta_0 + \beta_1 h_1 + \beta_2 h_2 + \beta_3 h_3 \quad (3.8)$$

onde:

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots$: coeficientes do modelo estimados na regressão.

Sabe-se da literatura que a Abordagem em Nível de Parcela Amostral não é dependente de uma alta densidade de pontos. Entretanto, levantamentos LIDAR utilizando-se de diferentes configurações (altura de voo, ângulo de varredura) resultarão em diferentes densidades de pontos/taxa de penetração, podendo gerar diferentes distribuições para as alturas do dossel e portanto, diferentes modelos. Um dos objetivos desta pesquisa é a investigação do impacto da configuração de voo na qualidade do modelo ajustado para diferentes espécies de floresta plantada. Mais especificamente deseja-se investigar, se a utilização de determinada configuração conduz a um modelo no qual as variáveis independentes melhor expliquem a variável florestal dependente de interesse.

Avaliação dos Modelos Ajustados

Para avaliação dos modelos selecionados pela regressão *stepwise* utilizou-se os seguintes critérios:

- i. Coeficiente de Determinação (R^2) (Equação 3.9): Expressa em termos percentuais o quanto de variação da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes. Quanto maior for o R^2 , mais explicativo é o modelo, isto é, melhor ele se ajusta à amostra.
- ii. Coeficiente de Correlação (R): Raiz quadrada do coeficiente de determinação.
- iii. Coeficiente de Determinação Ajustado ($R^2[ajustado]$) (Equação 3.10): A inclusão de inúmeras variáveis, mesmo que tenham muito pouco poder explicativo sobre a variável dependente, aumentarão o valor de R^2 . Isto incentiva a inclusão indiscriminada de variáveis. Para mitigar esta tendência, utiliza-se o coeficiente de determinação ajustado, que penaliza a inclusão de muitos coeficientes.
- iv. Erro Padrão da Estimativa (S_{yx}) (Equação 3.11a): Expressa o desvio médio entre os valores medidos e os valores estimados. Quanto menor for o valor percentual de S_{yx} (Equação 3.11b), melhor terá sido o ajuste. Para os modelos onde a variável dependente sofre

transformação, é necessário recalculer o erro padrão residual considerando a variável não transformada.

- v. Resíduo (e_i) (Equação 3.12a): Corresponde à diferença entre o valor medido e o valor estimado. Através da análise de resíduos é possível a detecção de possível tendenciosidade nas estimativas e *outliers*. O resíduo padronizado d_i (Equação 3.12b) permite melhor detecção de *outliers*. Se os erros têm distribuição normal, então aproximadamente 95% dos resíduos padronizados devem estar no intervalo de (-2,2). Resíduos fora desse intervalo podem indicar a presença de *outliers*.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n_p} (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.9)$$

onde:

n_p : tamanho da amostra (número de parcelas amostrais)

\bar{y} : média aritmética dos valores medidos/observados

y_i : valores medidos/observados

\hat{y}_i : valores estimados com o modelo ajustado

$$R^2(\text{ajustado}) = 1 - \left[1 - R^2 \left(\frac{n_p - 1}{n_p - n_c} \right) \right] \quad (3.10)$$

onde:

n_c : número de coeficientes do modelo ajustado

$$Syx = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_p} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n_p - n_c}} \quad (3.11a)$$

$$Syx(\%) = \frac{Syx}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (3.11b)$$

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (3.12a)$$

$$d_i = \frac{e_i}{S_{yx}} \quad (3.12b)$$

3.2.4.2 Abordagem em Nível de Árvore Individual

Na Abordagem em Nível de Árvore Individual, as variáveis florestais (ex.: diâmetro e volume individuais) são estimadas a partir de dados de árvore individual extraídos dos dados do LIDAR (ex.: altura individual, diâmetro de copa) (Equação 3.13).

$$y = f(h_1, h_2, h_3, h_4 \dots) \quad (3.13)$$

onde:

y : variável florestal de interesse (p. ex. volume individual);

f : função que relaciona os dados de árvore individual extraídos do LIDAR e a variável florestal de interesse;

$h_1, h_2, h_3, h_4 \dots$: dados de árvore individual extraídos dos dados do LIDAR (p.ex. altura individual, diâmetro de copa).

Algoritmo para Identificação Automática das Árvores

Para identificação das árvores a partir dos dados do LIDAR foi utilizado o algoritmo de máximo local para uma vizinhança definida, o qual já foi utilizado por vários autores em trabalhos anteriores (KAARTINEN e HYYPPÄ, 2008; KAARTINEN *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Neste algoritmo, cada ponto é analisado com relação a sua vizinhança. Se o ponto em análise apresentar altura maior que todos os pontos dentro da vizinhança definida, tal ponto será identificado como topo da árvore. A altura da árvore será a altura do ponto definido como topo da árvore. A vizinhança pode ser definida por um raio de busca fixo ou por um raio de busca variável (quando o diâmetro da copa apresenta correlação com a altura da árvore). Para este procedimento foram utilizados os dados do primeiro retorno do LIDAR. Para

obtenção da altura desses pontos, utilizou-se o mesmo procedimento descrito na Abordagem em Nível de Parcela Amostral (item 3.2.4.1). Para reduzir os erros de comissão, isto é, a detecção de árvores inexistentes, devido a ruídos nos dados, ao invés da utilização da nuvem de pontos original empregou-se modelo de altura interpolado e suavizado. Primeiramente foi gerado um TIN a partir dos pontos do primeiro retorno utilizando-se a informação de altura para a geração do modelo. Em seguida, esse modelo foi convertido para formato de grade regular com tamanho de célula de 20 cm. Para essa conversão, o valor de altura atribuído para a grade será o da projeção do centro da célula até o TIN. Para suavização do modelo utilizou-se o filtro passa-baixas (3x3) ilustrado na Figura 3.16, que consiste em uma convolução de uma máscara na imagem bruta. A metodologia utilizada é ilustrada na Figura 3.17.

| | | | |
|-----|----|----|----|
| 1/9 | +1 | +1 | +1 |
| | +1 | +1 | +1 |
| | +1 | +1 | +1 |

FIGURA 3.16 – FILTRO PASSA-BAIXAS UTILIZADO

Embora a utilização do modelo suavizado seja mais apropriada na identificação das árvores, o valor da altura acaba sendo subestimado. Para contornar esse problema, a partir das árvores identificadas buscou-se na nuvem de pontos original dentro do raio de busca o maior valor de altura.

Os resultados foram avaliados em termos do número de árvores automaticamente detectadas, altura individual e volume/ha, utilizando-se os dados do inventário como referência. Em se tratando da qualidade da identificação automática das árvores, foram computados os erros de omissão (Equação 3.14), comissão (Equação 3.15) e a percentagem de acerto (Equação 3.16).

$$\text{Erros de Omissão (\%)} = \frac{\text{Número de Árvores Não Detectadas}}{\text{Número Total de Árvores Existentes}} \quad (3.14)$$

$$\text{Erros de Comissão (\%)} = \frac{\text{Número de Árvores Erroneamente Detectadas}}{\text{Número Total de Árvores Existentes}} \quad (3.15)$$

$$\text{Acerto (\%)} = \frac{\text{Número de Árvores Corretamente Detectadas}}{\text{Número Total de Árvores Existentes}} \quad (3.16)$$

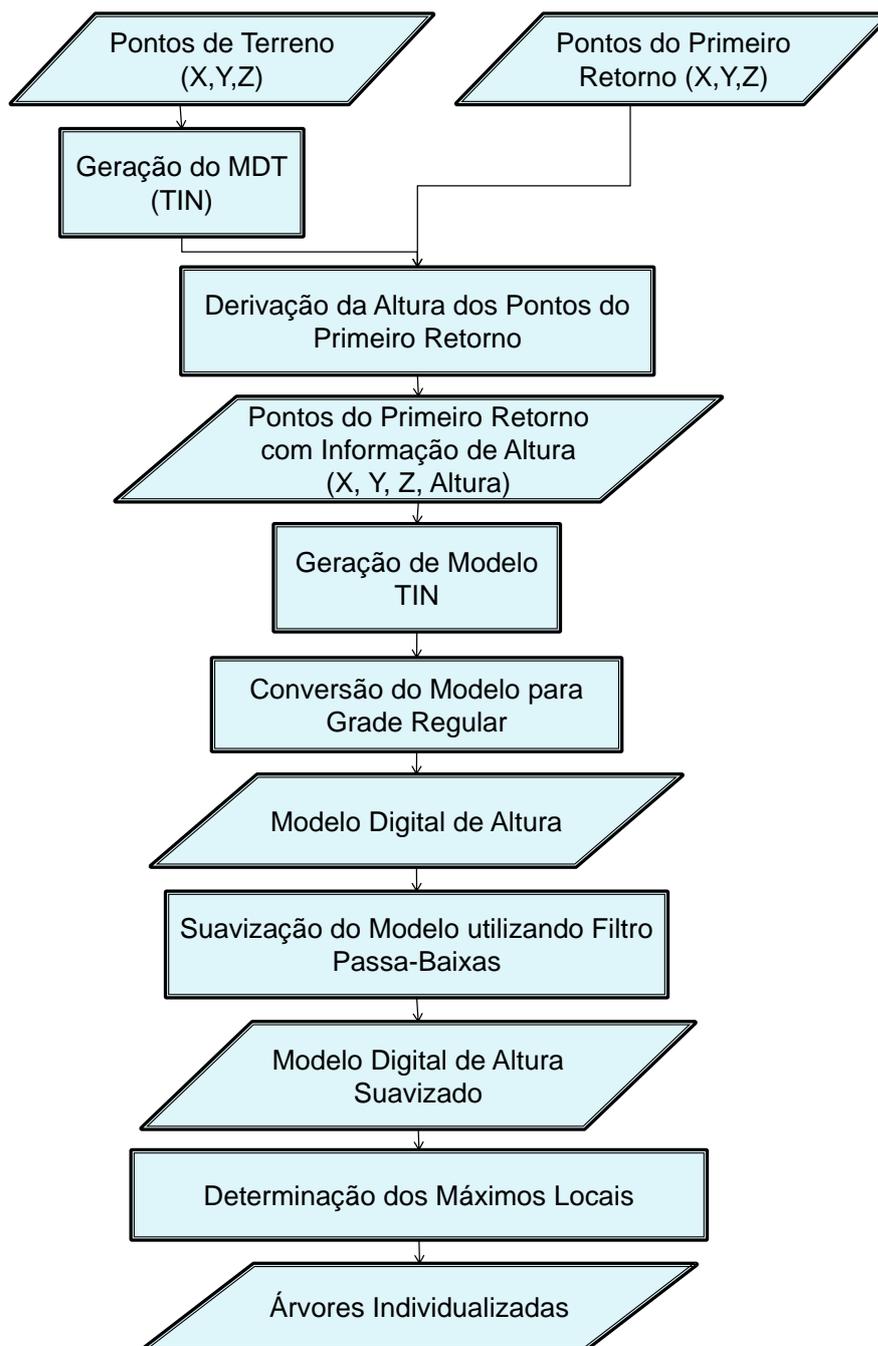


FIGURA 3.17 – METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DAS ÁRVORES A PARTIR DOS DADOS DO LIDAR

Para avaliação da altura individual das árvores foi realizada a comparação entre as alturas do inventário, obtidas conforme procedimento descrito no item 3.2.1.2.1, e as alturas extraídas dos dados LIDAR. Para tanto foram computados o erro médio, desvio-padrão e o REMQ

(Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático) mostrados nas Equações 3.17, 3.18 e 3.19, respectivamente.

$$erro\ médio = \frac{\sum_{i=1}^N Altura_{Lidar} - Altura_{inventário}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta h_i}{N} \quad (3.17a)$$

$$erro\ médio\ (%) = \frac{erro\ médio}{Altura_{Inventário}} \quad (3.17b)$$

$$desvio\ padrão = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta h_i - erro\ médio)^2}{N}} \quad (3.18a)$$

$$desvio\ padrão\ (%) = \frac{desvio\ padrão}{Altura_{Inventário}} \quad (3.18b)$$

$$REM\ Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Altura_{Lidar} - Altura_{inventário})^2}{N}} \quad (3.19a)$$

$$REM\ Q\ (%) = \frac{REM\ Q}{Altura_{inventário}} \quad (3.19b)$$

onde:

$Altura_{Lidar}$: Altura extraída dos dados do LIDAR;

$Altura_{Inventário}$: Altura proveniente do inventário florestal;

N : Número de árvores

Para avaliação do impacto combinado do número de árvores identificadas e das alturas individuais extraídas dos dados do LIDAR o volume individual foi computado utilizando-se equação de volume fornecida pela KLABIN S/A para cada espécie florestal investigada nesta pesquisa. Os volumes computados a partir dos dados extraídos do LIDAR foram comparados com os

volumes do inventário florestal. Para este propósito foi computado o erro volumétrico mostrado nas Equações 3.20.

$$erro = Volume/ha_{LiDAR} - Volume/ha_{Inventário} \quad (3.20a)$$

$$erro\ médio\ (\%) = \frac{erro}{Volume/ha_{Inventário}} \quad (3.20b)$$

onde:

$Volume/ha_{LiDAR}$: Volume computado utilizando-se equação de volume fornecida pela KLABIN S/A e os dados extraídos do LIDAR;

$Volume/ha_{Inventário}$: Volume proveniente do inventário florestal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos na pesquisa visando à avaliação da influência da configuração de voo utilizada na qualidade dos modelos digitais de terreno e variáveis florestais derivadas.

4.1 OBTENÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE TERRENO

Os pontos provenientes do último retorno foram classificados utilizando o método descrito no item 3.2.2. A densidade de pontos classificados como sendo de terreno para cada um dos talhões investigados é mostrada na Tabela 4.1. Nesta tabela pode-se notar que houve maior penetração de pontos no terreno no Talhão C (*Pinus taeda* – 1997). Tal comportamento pode ser explicado pelo fato desta plantação de *Pinus* ter idade de 12 anos e, portanto já ter começado a sofrer desbastes, uma vez que os desbastes são iniciados aos sete anos de idade. Um melhor desempenho do Talhão B (*Eucalyptus* Híbrido - 2006) quando comparado com o Talhão A (*Pinus taeda* – 2004) pode ser explicado pelo fato do Talhão A possuir copa mais densa e desenvolvida, estar mais próxima do início da competição e possuir menor espaçamento (ver Tabela 3.1). Tais características dificultam a penetração dos pontos no terreno.

Para efeitos de ilustração da altimetria, os modelos digitais TIN gerados utilizando os pontos do último retorno e os pontos classificados como terreno são mostrados na Figura 4.1 para os três talhões de estudo utilizando a configuração I.

TABELA 4.1 – DENSIDADE DE PONTOS DE TERRENO

| Configuração | Densidade Pontos de Terreno (pontos/m ²) | | |
|--------------|---------------------------------------------------------|----------|----------|
| | Talhão A | Talhão B | Talhão C |
| I | 0,24 | 0,90 | 1,01 |
| II | 0,23 | 0,76 | 1,02 |
| III | 0,14 | 0,79 | 0,71 |
| IV | 0,07 | 0,31 | 0,45 |
| V | 0,11 | 0,11 | 0,41 |
| VI | 0,07 | 0,06 | 0,29 |
| VII | 0,03 | 0,03 | 0,18 |
| VIII | 0,02 | 0,02 | 0,06 |

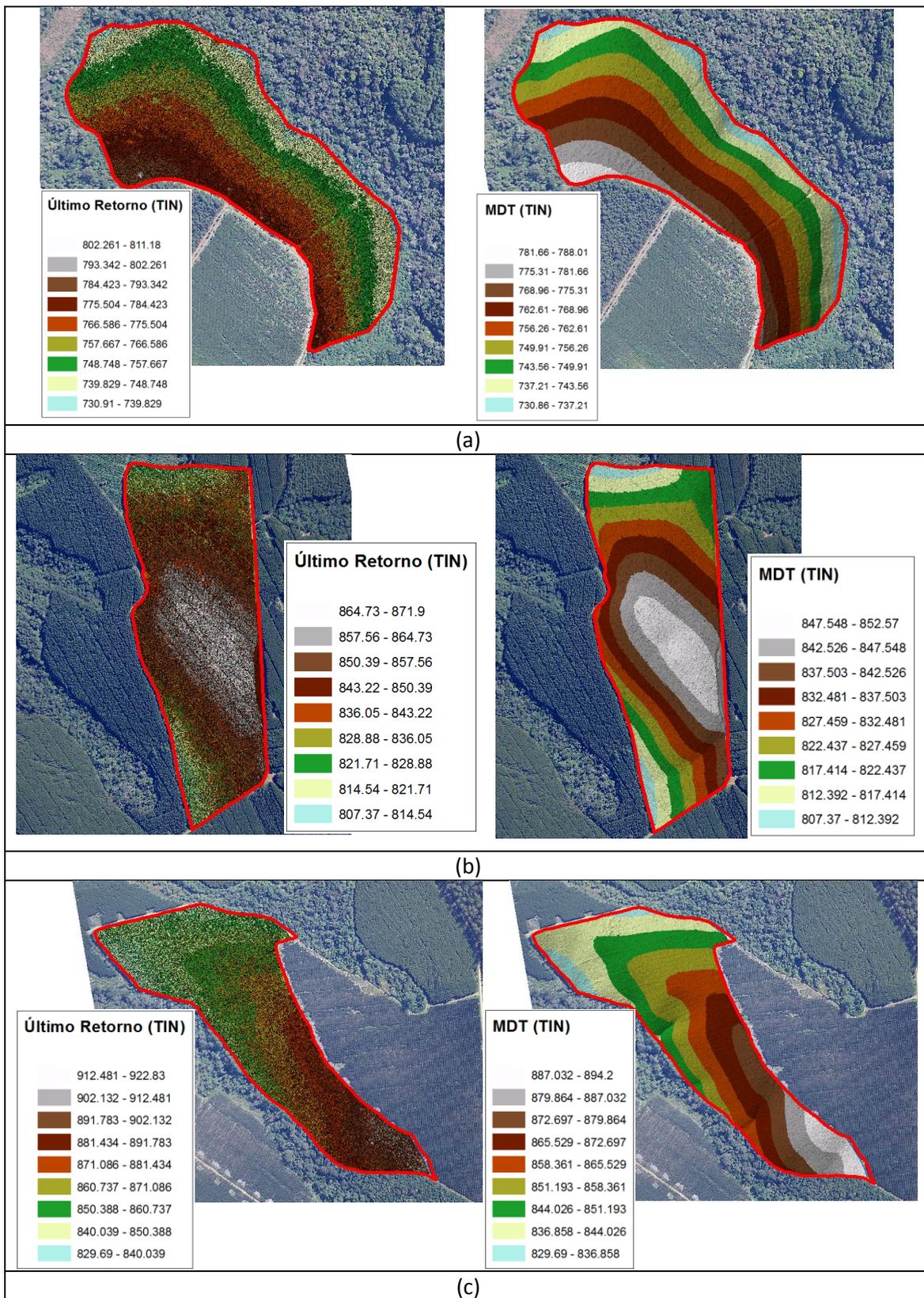


FIGURA 4.1 – MODELO DIGITAL (TIN) GERADO A PARTIR DOS PONTOS DO ÚLTIMO RETORNO E DOS PONTOS CLASSIFICADOS COMO DE TERRENO DA CONFIGURAÇÃO I PARA OS TALHÕES A (a), B (b) E C (c)

4.2 AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE TERRENO

Para avaliação da exatidão dos modelos digitais de terreno, derivados para cada uma das configurações e talhões investigados, foi utilizada metodologia descrita no item 3.2.3. Os resultados são apresentados na sequência.

4.2.1 Ajustamento das Faixas

A Tabela 4.2 mostra os parâmetros de transformação (discrepâncias) entre a faixa tomada como referência no ajustamento (em negrito) e as demais faixas para cada uma das configurações no Talhão A. Na Tabela 4.2 também são apresentados os fatores de variância a-posteriori dos ajustamentos.

Pode-se observar na Tabela 4.2 que a magnitude das discrepâncias entre as faixas não é aumentada para as configurações que utilizam maior altura de voo (configurações V a VIII), demonstrando que a hipótese de que apenas erros na trajetória do sistema persistem, ou seja, de que os erros sistemáticos nos parâmetros do sistema já foram eliminados no processo de calibração, é verdadeira. Para detalhes sobre o impacto dos erros sistemáticos nos parâmetros do sistema (principalmente no desalinhamento entre os sensores) consultar Kersting (2011). Outra possibilidade seria a existência de erros sistemáticos nos parâmetros do sistema não modelados no processo de calibração, os quais não possuem impacto dependente da altura de voo utilizada.

Observa-se na Tabela 4.2 que a configuração na qual houve maiores discrepâncias foi a configuração II. É importante mencionar que a coleta dos dados utilizando as diferentes configurações foram realizadas em diferentes missões. Na missão em que foi feita a coleta dos dados utilizando a configuração II, as condições de GPS (número de satélites e geometria) estavam menos favoráveis, fato este que explica maiores discrepâncias entre as faixas desta configuração.

Para a configuração VIII não foi realizado ajustamento, uma vez que apenas uma faixa foi necessária para recobrimento da área de estudo usando tal configuração.

TABELA 4.2 – AJUSTAMENTO DE FAIXAS - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE A FAIXA DE REFERÊNCIA E AS DEMAIS FAIXAS DO TALHÃO A PARA CADA UMA DAS CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS

| Talhão A | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Config. | Faixa | X_T (m) | Y_T (m) | Z_T (m) | σ(m) |
| I | Faixa 2 | 0,28 | 0,09 | -0,05 | 0,06 |
| | Faixa 3 | 0,22 | 0,10 | -0,06 | |
| | Faixa 4 | 0,15 | 0,08 | -0,06 | |
| | Faixa 5 | -0,06 | 0,07 | -0,04 | |
| | Faixa 6 | 0,07 | 0,02 | -0,01 | |
| | Faixa 7 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 8 | -0,02 | -0,06 | 0,01 | |
| | Faixa 9 | -0,08 | -0,15 | 0,03 | |
| | Faixa 10 | -0,15 | -0,22 | 0,06 | |
| | Faixa 11 | -0,03 | -0,19 | 0,06 | |
| | Faixa 12 | 0,02 | -0,25 | 0,07 | |
| | II | Faixa 1 | 0,93 | 0,17 | |
| Faixa 2 | | 0,71 | 0,07 | 0,00 | |
| Faixa 3 | | 0,24 | 0,00 | 0,00 | |
| Faixa 4 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| Faixa 5 | | -0,38 | 0,00 | 0,02 | |
| Faixa 6 | | -0,58 | -0,12 | 0,02 | |
| Faixa 7 | | -0,81 | -0,12 | 0,02 | |
| III | Faixa 1 | 0,01 | -0,03 | -0,02 | 0,08 |
| | Faixa 2 | 0,16 | -0,01 | -0,03 | |
| | Faixa 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 4 | 0,06 | -0,09 | 0,00 | |
| IV | Faixa 1 | 0,30 | -0,13 | -0,02 | 0,09 |
| | Faixa 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| V | Faixa 1 | -0,46 | -0,19 | -0,01 | 0,06 |
| | Faixa 2 | -0,01 | -0,07 | 0,00 | |
| | Faixa 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 4 | 0,07 | -0,11 | -0,01 | |
| | Faixa 5 | 0,28 | -0,16 | -0,02 | |
| VI | Faixa 1 | -0,26 | -0,09 | -0,01 | 0,07 |
| | Faixa 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 3 | 0,49 | 0,17 | -0,04 | |
| VII | Faixa 1 | 0,48 | 0,00 | -0,02 | 0,08 |
| | Faixa 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| VIII | Composta de uma única faixa | | | | |

A Tabela 4.3 mostra os parâmetros de transformação (discrepâncias) entre a faixa tomada como referência no ajustamento (em negrito) e as demais faixas para cada uma das configurações no Talhão B. Na Tabela 4.3 também são apresentados os fatores de variância a-posteriori dos ajustamentos.

Novamente, nota-se que a configuração na qual houve maiores discrepâncias foi a configuração II pelas razões já mencionadas.

Para as configurações VII e VIII não foi realizado ajustamento, uma vez que apenas uma faixa foi necessária para recobrimento da área de estudo usando tais configurações.

TABELA 4.3 – AJUSTAMENTO DE FAIXAS - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE A FAIXA DE REFERÊNCIA E AS DEMAIS FAIXAS DO TALHÃO B PARA CADA UMA DAS CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS

| Talhão B | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Config. | Faixa | X_T (m) | Y_T (m) | Z_T (m) | σ(m) |
| I | Faixa 29 | 0,17 | -0,21 | 0,02 | 0,06 |
| | Faixa 15 | 0,18 | -0,17 | 0,02 | |
| | Faixa 16 | 0,10 | -0,13 | 0,01 | |
| | Faixa 17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 18 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | |
| | Faixa 19 | 0,05 | 0,12 | 0,00 | |
| | Faixa 20 | 0,13 | 0,12 | 0,01 | |
| II | Faixa 9 | 0,70 | -0,03 | 0,05 | 0,08 |
| | Faixa 10 | 0,45 | -0,11 | -0,04 | |
| | Faixa 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 12 | -0,33 | -0,11 | -0,02 | |
| III | Faixa 13 | -0,28 | -0,06 | -0,03 | 0,08 |
| | Faixa 5 | 0,16 | -0,11 | 0,00 | |
| | Faixa 6 | 0,09 | -0,09 | 0,00 | |
| | Faixa 7 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| IV | Faixa 8 | 0,11 | -0,03 | 0,02 | 0,09 |
| | Faixa 3 | 0,07 | -0,12 | -0,02 | |
| V | Faixa 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 |
| | Faixa 6 | -0,04 | 0,03 | 0,02 | |
| VI | Faixa 8 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,09 |
| | Faixa 4 | -0,27 | 0,26 | -0,03 | |
| VII | Composta de uma única faixa | | | | |
| VIII | Composta de uma única faixa | | | | |

A Tabela 4.4 mostra os parâmetros de transformação (discrepâncias) entre a faixa tomada como referência no ajustamento (em negrito) e as demais faixas para cada uma das configurações no Talhão C, bem como os fatores de variância a-posteriori dos ajustamentos.

Novamente, a configuração com maiores discrepâncias foi a II da mesma forma que ocorreu com demais talhões haja vista que os mesmos foram mapeados em uma mesma missão.

Para a configuração VIII não foi realizado ajustamento, uma vez que apenas uma faixa foi necessária para recobrimento da área de estudo usando tal configuração.

TABELA 4.4 – AJUSTAMENTO DE FAIXAS - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE A FAIXA DE REFERÊNCIA E AS DEMAIS FAIXAS DO TALHÃO C PARA CADA UMA DAS CONFIGURAÇÕES INVESTIGADAS

| Talhão C | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Config. | Faixa | X_T (m) | Y_T (m) | Z_T (m) | σ(m) |
| I | Faixa 4 | 0,34 | -0,26 | 0,04 | 0,05 |
| | Faixa 5 | 0,12 | -0,12 | 0,02 | |
| | Faixa 6 | 0,12 | -0,14 | 0,01 | |
| | Faixa 7 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 8 | -0,07 | 0,02 | -0,01 | |
| | Faixa 9 | -0,12 | 0,15 | -0,02 | |
| | Faixa 10 | -0,12 | 0,11 | -0,02 | |
| | Faixa 11 | -0,35 | 0,20 | -0,07 | |
| | Faixa 28 | 0,03 | -0,14 | 0,00 | |
| II | Faixa 2 | 0,61 | 0,15 | -0,02 | 0,07 |
| | Faixa 3 | 0,04 | 0,20 | -0,02 | |
| | Faixa 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 5 | -0,53 | 0,19 | -0,06 | |
| | Faixa 6 | -0,74 | 0,04 | -0,05 | |
| III | Faixa 1 | 0,22 | -0,21 | 0,01 | 0,08 |
| | Faixa 2 | 0,06 | -0,08 | 0,00 | |
| | Faixa 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 4 | -0,02 | 0,24 | -0,01 | |
| IV | Faixa 1 | 0,10 | 0,18 | -0,01 | 0,09 |
| | Faixa 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| V | Faixa 2 | -0,15 | -0,03 | 0,00 | 0,07 |
| | Faixa 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 4 | 0,07 | 0,07 | -0,02 | |
| | Faixa 5 | 0,29 | 0,02 | -0,02 | |
| VI | Faixa 1 | -0,17 | -0,06 | -0,01 | 0,07 |
| | Faixa 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| | Faixa 3 | 0,34 | -0,15 | 0,02 | |
| VII | Faixa 1 | 0,21 | 0,07 | 0,00 | 0,08 |
| | Faixa 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| VIII | Composta de uma única faixa | | | | |

4.2.2 Avaliação da Exatidão dos Modelos Digitais de Terreno

Após o ajuste das faixas, foram verificados os erros sistemáticos entre os dados do LIDAR e a informação de controle e realizado adequado registro entre os mesmos. Para tanto, foram utilizados os pontos levantados nas parcelas amostrais através de topografia convencional (ver item 3.2.1.2.2). Foram utilizados aproximadamente 20 pontos de controle por parcela. As Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 mostram os parâmetros de transformação (discrepâncias) entre os dados do LIDAR e a informação de controle para cada uma das configurações nos talhões A, B e C, respectivamente. Nestas tabelas também são mostrados os fatores de variância a-posteriori dos ajustamentos.

Para os dados do Talhão *B*, maiores discrepâncias com a informação de controle são observadas. Uma das possíveis causas seriam erros sistemáticos nos dados do levantamento topográfico deste talhão. A investigação das causas para esses erros sistemáticos vai além do escopo deste trabalho.

TABELA 4.5 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE OS DADOS DO LIDAR (AJUSTADOS) E A INFORMAÇÃO DE CONTROLE PARA O TALHÃO A

| Talhão A | | | | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Configuração | X_T (m) | Y_T (m) | Z_T (m) | σ(m) |
| I | 0,35 | 0,28 | -0,02 | 0,06 |
| II | 0,00 | 0,50 | 0,02 | 0,07 |
| III | 0,12 | 0,48 | 0,06 | 0,07 |
| IV | 0,19 | 0,39 | 0,01 | 0,08 |
| V | 0,31 | 0,34 | 0,07 | 0,07 |
| VI | 0,41 | 0,25 | 0,13 | 0,07 |
| VII | 0,12 | 0,42 | 0,05 | 0,08 |
| VIII | 0,03 | 0,26 | -0,03 | 0,08 |

TABELA 4.6 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE OS DADOS DO LIDAR (AJUSTADOS) E A INFORMAÇÃO DE CONTROLE PARA O TALHÃO B

| Talhão B | | | | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Configuração | X_T (m) | Y_T (m) | Z_T (m) | σ(m) |
| I | 0,51 | 0,94 | -0,15 | 0,08 |
| II | 0,54 | 1,07 | -0,17 | 0,08 |
| III | 0,76 | 0,85 | -0,06 | 0,08 |
| IV | 0,74 | 1,25 | -0,12 | 0,08 |
| V | 0,97 | 0,66 | -0,10 | 0,08 |
| VI | 0,58 | 1,01 | -0,03 | 0,09 |
| VII | 0,84 | 1,04 | -0,09 | 0,09 |
| VIII | -0,06 | 1,94 | -0,05 | 0,09 |

TABELA 4.7 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO (DISCREPÂNCIAS) ENTRE OS DADOS DO LIDAR (AJUSTADOS) E A INFORMAÇÃO DE CONTROLE PARA O TALHÃO C

| Talhão C | | | | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Configuração | X_T (m) | Y_T (m) | Z_T (m) | σ(m) |
| I | 0,35 | 0,28 | -0,02 | 0,06 |
| II | 0,00 | 0,50 | 0,02 | 0,07 |
| III | 0,12 | 0,48 | 0,06 | 0,07 |
| IV | 0,19 | 0,39 | 0,01 | 0,08 |
| V | 0,31 | 0,34 | 0,07 | 0,07 |
| VI | 0,41 | 0,25 | 0,13 | 0,07 |
| VII | 0,12 | 0,42 | 0,05 | 0,08 |
| VIII | 0,03 | 0,26 | -0,03 | 0,08 |

Após registro entre os dados do LIDAR e a informação de controle, a exatidão altimétrica dos modelos digitais de terreno derivados para cada uma das configurações foi avaliada. Os resultados são apresentados na Tabela 4.8. Os resultados apresentados na Tabela 4.8 representam a média dos resultados

obtidos para cada parcela amostral. Os resultados por parcela não são mostrados pelo fato de não terem sido observadas diferenças significativas.

Dentre os talhões estudados, pode-se notar que os modelos de terreno no Talhão C apresentaram maior exatidão, porém não muito superiores. Também se pode observar para todos os talhões que as diferentes configurações utilizadas resultaram em exatidões bastante semelhantes. Tal comportamento pode ser explicado pelas características do terreno dos talhões utilizados que apresentam topografia sem variações locais no relevo de forma que poucos pontos se fazem necessários para modelagem do terreno.

TABELA 4.8 – EXATIDÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE TERRENO GERADOS PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES E TALHÕES

| Configuração | REMQ (m) | | |
|--------------|----------|----------|----------|
| | Talhão A | Talhão B | Talhão C |
| I | 0,13 | 0,12 | 0,09 |
| II | 0,13 | 0,11 | 0,10 |
| III | 0,12 | 0,11 | 0,09 |
| IV | 0,16 | 0,12 | 0,11 |
| V | 0,15 | 0,14 | 0,11 |
| VI | 0,15 | 0,15 | 0,11 |
| VII | 0,22 | 0,16 | 0,13 |
| VIII | 0,19 | 0,17 | 0,15 |

4.3 OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS FLORESTAIS

Utilizando as metodologias descritas no item 3.2.4, foram realizados experimentos utilizando as abordagens em nível de parcela amostral e em nível de árvore individual. Durante a realização dos experimentos, notou-se a presença de vento durante a coleta dos dados correspondentes às configurações II e III no Talhão B (*Eucalyptus* Híbrido). A Figura 4.2 ilustra o modelo digital gerado com a informação de altura obtido utilizando os dados da configuração I (Figura 4.2a), os quais foram coletados na ausência de vento na área de estudo, e o modelo digital de altura obtido utilizando os dados da configuração II, os quais foram coletados durante a presença de vento (Figura 4.2b).

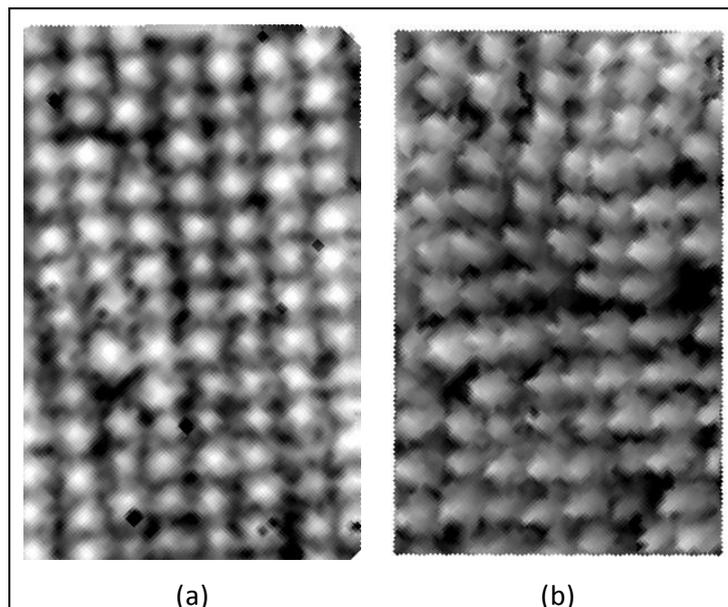


FIGURA 4.2 – MODELO DE ALTURA GERADO A PARTIR DE DADOS SEM PRESENÇA DE VENTO (a) DADOS LEVANTADOS COM PRESENÇA DE VENTO (b) NO TALHÃO *B*

Além de causar a redução da altura de algumas das árvores e alterar o posicionamento relativo entre o topo das árvores do talhão, a presença de vento gera discrepância entre os dados provenientes de diferentes faixas de voo. Isso se deve ao fato de a intensidade e/ou direção do vento ser diferente durante a coleta dos dados de cada uma das faixas de forma que o posicionamento das árvores difere de uma faixa para a outra. A Figura 4.3 ilustra exemplos de parcelas em regiões de sobreposição de faixas no Talhão *B*. Pode-se notar que o modelo de alturas gerado na região de sobreposição é bastante ruidoso (Figura 4.3b), o que impossibilita adequada identificação das árvores. Para mitigar esse problema foram removidas as sobreposições, deixando apenas dados de uma das faixas na região de sobreposição (Figura 4.3c). Este procedimento foi realizado para todas as configurações e talhões visando garantir adequada comparação entre os resultados provenientes das diversas configurações usando as diferentes abordagens nos diferentes talhões.

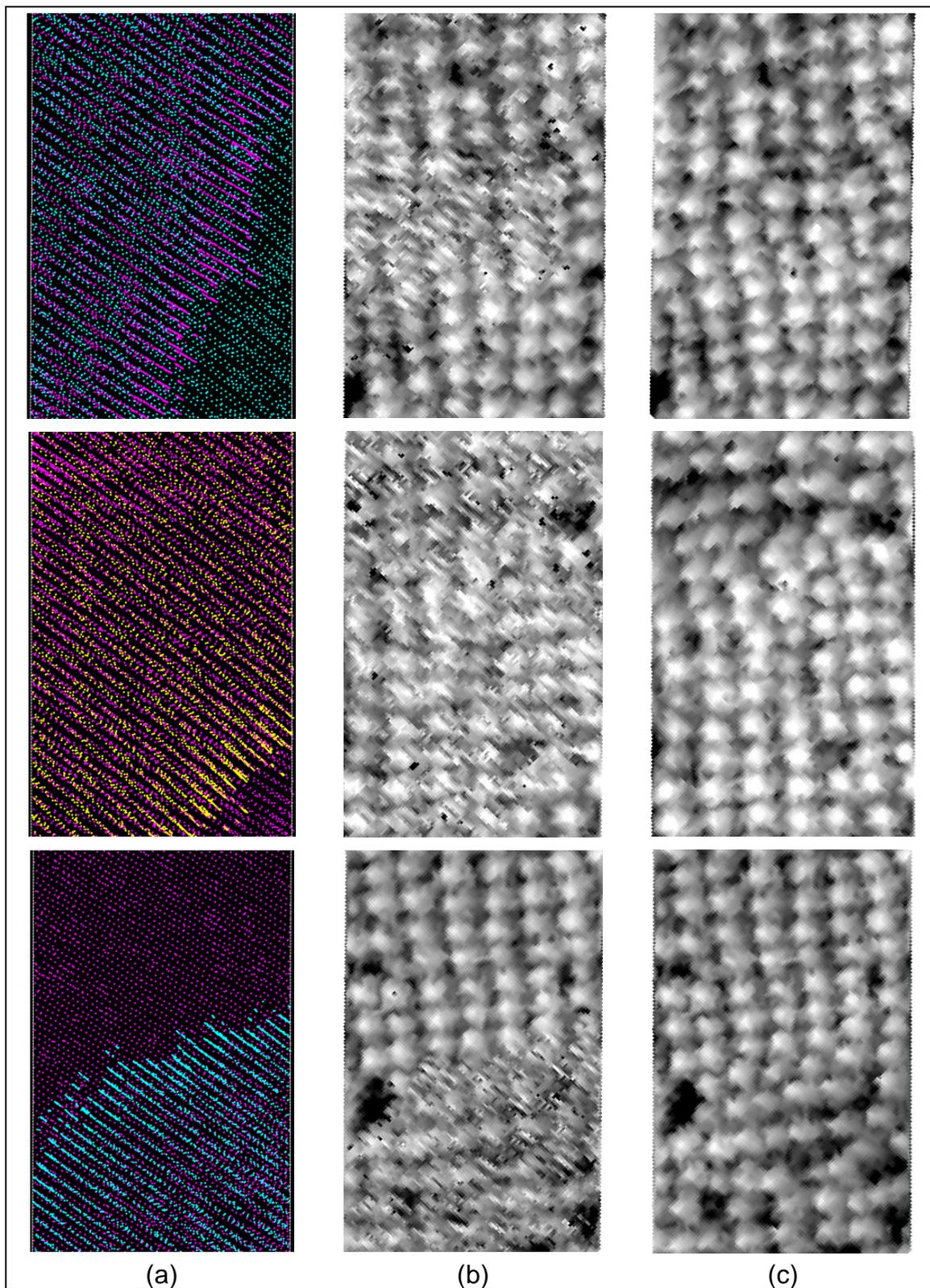


FIGURA 4.3 – FAIXAS SOBREPOSTAS (a), MODELOS DE ALTURA GERADOS CONSIDERANDO SOBREPOSIÇÃO DE FAIXAS (b), MODELOS DE ALTURA GERADOS APÓS REMOÇÃO DA SOBREPOSIÇÃO DE FAIXAS (c)

Na sequência são mostrados os resultados utilizando a Abordagem em Nível de Parcela Amostral e em Nível de Árvore Individual.

4.3.1 Abordagem em Nível de Parcela Amostral

Conforme descrito no item 3.2.4.1, serão analisadas como variáveis dependentes o volume/ha, a altura média, o diâmetro médio bem como suas transformadas. As variáveis independentes extraídas do LIDAR que resultam nas melhores relações estatísticas são identificadas através do procedimento *stepwise* de regressão utilizando modelo matemático apresentado na Equação 3.5. Utilizou-se um nível de significância máximo de probabilidade F superior a 0,25.

A seguir são apresentados os resultados agrupados por talhão e por variáveis dependentes consideradas.

4.3.1.1 Resultados Talhão A (*Pinus taeda* – 2004)

Volume/ha e Transformadas

As Tabelas 4.9 a 4.13 mostram os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado (R^2 [Ajustado]) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável dependente volume/ha e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso).

Pode-se observar na Tabela 4.9 que para a variável volume/ha as diferentes configurações resultaram em modelos com expressiva variação na qualidade de ajuste (R^2 variando de 0,51 a 0,81). As configurações que resultaram em melhor qualidade de ajuste foram as configurações I e a VI com valores R^2 e R^2 [Ajustado] de (0,81; 0,76) e (0,78; 0,71), respectivamente.

TABELA 4.9 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL | | | | |
|---------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,901 | 0,813 | 0,756 | Constante, f_h902, f_h90, p10 |
| II | 0,715 | 0,512 | 0,471 | Constante, f_h902 |
| III | 0,842 | 0,709 | 0,656 | Constante, f_h70_inv, p902 |
| IV | 0,836 | 0,698 | 0,643 | Constante, f_h502, f_h50_inv |
| V | 0,779 | 0,606 | 0,573 | Constante, f_Havg_inv |
| VI | 0,882 | 0,779 | 0,712 | Constante, f_Havg_inv, p902, f_Havg2 |
| VII | 0,719 | 0,517 | 0,477 | Constante, f_h90_inv |
| VIII | 0,725 | 0,526 | 0,486 | Constante, f_h902 |

Para a variável dependente quadrado do volume/ha (Tabela 4.10) também houve variação expressiva da qualidade de ajuste para as configurações testadas (R² variando de 0,52 a 0,85). As configurações que resultaram em modelos com melhor qualidade de ajuste foram as configurações III, I e a VI com valores R² e R²[Ajustado] de (0,85; 0,80), (0,84; 0,79) e (0,78; 0,71), respectivamente.

TABELA 4.10 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL² | | | | |
|---------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,915 | 0,838 | 0,789 | Constante, f_h902, f_h90, p10 |
| II | 0,729 | 0,531 | 0,492 | Constante, f_h902 |
| III | 0,921 | 0,848 | 0,802 | Constante, f_h902, f_h90_inv, p902 |
| IV | 0,856 | 0,732 | 0,684 | Constante, f_h502, f_h50_in |
| V | 0,791 | 0,626 | 0,594 | Constante, f_h702 |
| VI | 0,882 | 0,777 | 0,710 | Constante, f_Havg_inv, p902, f_Havg2 |
| VII | 0,724 | 0,524 | 0,485 | Constante, f_h90_inv |
| VIII | 0,732 | 0,535 | 0,497 | Constante, f_h902 |

De forma similar à variável dependente volume/ha para a variável transformada raiz quadrada do volume/ha (Tabela 4.11) as configurações que resultaram em modelos com melhor qualidade de ajuste foram as configurações I e a VI com valores R² e R²[Ajustado] de (0,80; 0,74) e (0,78; 0,71),

respectivamente. O coeficiente de determinação (R^2) para as diferentes configurações variou de 0,50 a 0,80.

TABELA 4.11 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE RAIZ QUADRADO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_sqrt | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|------------------|---------------------------------------|
| Config. | R | R^2 | R^2 (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,893 | 0,798 | 0,738 | Constante, f_h902, f_h90, p10 |
| II | 0,708 | 0,501 | 0,459 | Constante, f_Havg_inv |
| III | 0,842 | 0,709 | 0,656 | Constante, f_h70_inv, p902 |
| IV | 0,825 | 0,680 | 0,622 | Constante, f_h502, f_h50inv |
| V | 0,774 | 0,600 | 0,566 | Constante, f_Havg_inv |
| VI | 0,882 | 0,779 | 0,712 | Constante, f_Havg_inv, p902, f_Havg2 |
| VII | 0,717 | 0,514 | 0,473 | Constante, f_h90_inv |
| VIII | 0,721 | 0,520 | 0,480 | Constante, f_h902 |

A Tabela 4.12 mostra que para a variável dependente logaritmo do volume/ha a configuração que resultou no modelo com melhor qualidade de ajuste foi a configuração VI com valores R^2 e R^2 [Ajustado] de (0,78; 0,71). O coeficiente de determinação (R^2) para as diferentes configurações variou de 0,48 a 0,78.

TABELA 4.12 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE LOGARITMO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_In | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|------------------|---------------------------------------|
| Config. | R | R^2 | R^2 (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,691 | 0,478 | 0,435 | Constante, f_h30_inv |
| II | 0,704 | 0,495 | 0,453 | Constante, f_Havg_inv |
| III | 0,842 | 0,709 | 0,656 | Constante, f_h70_inv, p902 |
| IV | 0,813 | 0,660 | 0,599 | Constante, f_h502, f_h50_inv |
| V | 0,770 | 0,592 | 0,558 | Constante, f_Havg_inv |
| VI | 0,882 | 0,778 | 0,712 | Constante, f_Havg_inv, p902, f_Havg2 |
| VII | 0,714 | 0,509 | 0,468 | Constante, f_h90_inv |
| VIII | 0,716 | 0,513 | 0,473 | Constante, f_h902 |

Para a variável dependente inverso do volume/ha (Tabela 4.13) as configurações que resultaram em modelos com melhor qualidade de ajuste foram as configurações VII e VI com valores R^2 e R^2 [Ajustado] de (0,85; 0,81) e (0,78;

0,71). Para esta variável também se observa significativa variação na qualidade de ajuste para as diferentes configurações de voo (R^2 variando de 0,47 a 0,85).

TABELA 4.13 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_inv | | | | |
|------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------------------------------------|
| Config. | R | R^2 | R^2 (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,688 | 0,473 | 0,429 | Constante, f_h30_inv |
| II | 0,694 | 0,481 | 0,438 | Constante, f_Havg_inv |
| III | 0,834 | 0,696 | 0,641 | Constante, f_h50_inv, p902 |
| IV | 0,689 | 0,475 | 0,431 | Constante, f_Havg2 |
| V | 0,759 | 0,576 | 0,540 | Constante, f_Havg_inv |
| VI | 0,881 | 0,776 | 0,709 | Constante, f_Havg_inv, p902, f_Havg2 |
| VII | 0,922 | 0,850 | 0,805 | Constante, f_Havg_inv, f_Havg2, f_Hdesvio_inv |
| VIII | 0,706 | 0,498 | 0,457 | Constante, f_h902 |

Em resumo, para a variável volume e suas transformadas, os melhores resultados em termos de R^2 (ajustado) foram encontrados na variável dependente quadrado do volume com R^2 (ajustado) de 0,80, na configuração III que corresponde a ~52 min de voo, e na variável dependente inverso do volume com R^2 (ajustado) de 0,81, na configuração VII que corresponde a ~17 min de voo.

A Figura 4.4 mostra o gráfico relacionando a variável quadrado do volume (obtida dos dados do inventário) e o valor de volume ao quadrado estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração III. A Figura 4.5 mostra o gráfico relacionando o valor de volume ao quadrado residual (padronizado) e o valor de volume ao quadrado estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração III. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram gráficos similares para a variável inverso do volume e configuração VII.

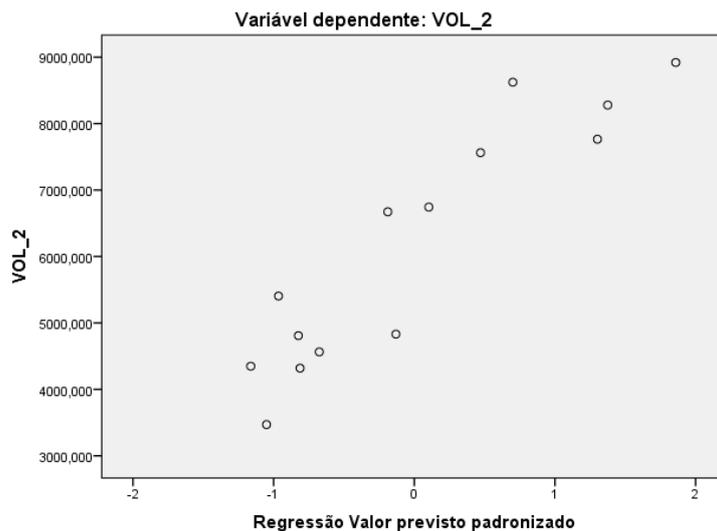


FIGURA 4.4 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME AO QUADRADO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: VOLUME AO QUADRADO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO III (PADRONIZADO)

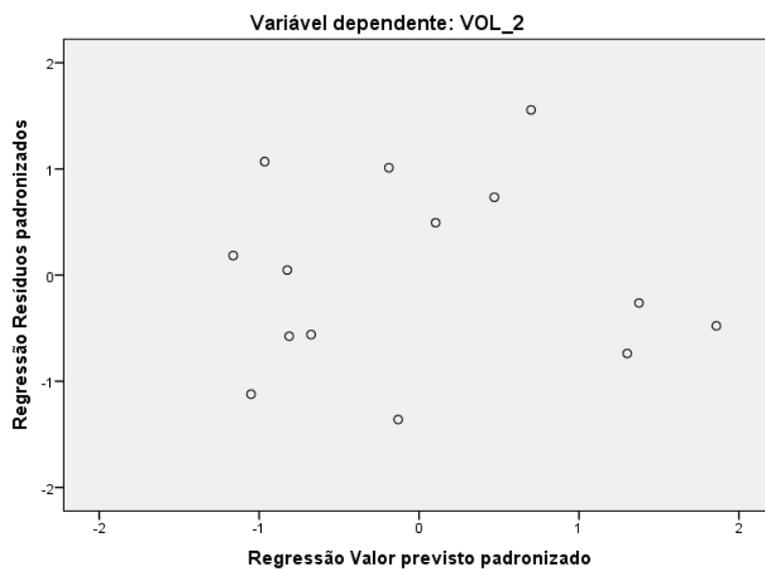


FIGURA 4.5 – EIXO VERTICAL: VOLUME AO QUADRADO RESÍDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: VOLUME AO QUADRADO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO III (PADRONIZADO)

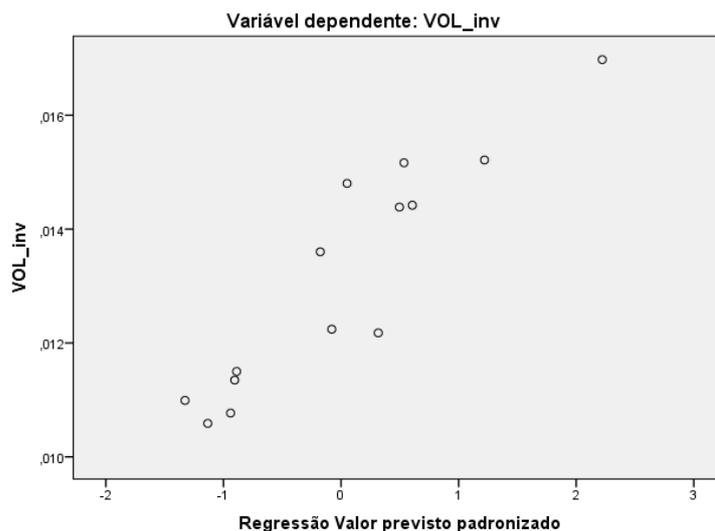


FIGURA 4.6 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE INVERSO DO VOLUME OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO)

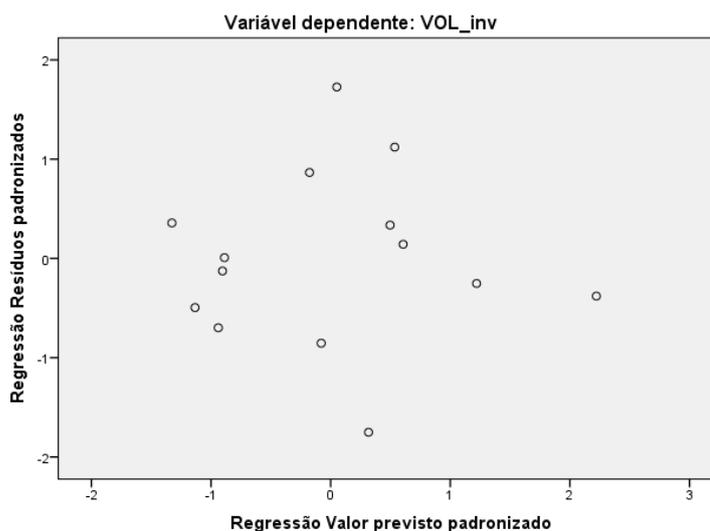


FIGURA 4.7 – EIXO VERTICAL: VOLUME AO QUADRADO RESÍDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: VOLUME AO QUADRADO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO)

Diâmetro Médio e Transformadas

Os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado (R^2 [Ajustado]) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável dependente o diâmetro médio e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso) são apresentados nas Tabelas 4.14 a 4.18. Pode-se

observar que quando comparado com os resultados obtidos para a variável volume e suas transformadas a qualidade de ajuste dos modelos foi inferior para a variável diâmetro médio e suas transformadas.

Para a variável diâmetro médio e suas transformadas também se observa razoável variação na qualidade de ajuste para as diferentes configurações de voo com valores de R^2 variando de 0,43 a 0,74 para a variável diâmetro médio (Tabela 4.14), de 0,45 a 0,74 para a variável quadrado do diâmetro médio (Tabela 4.15), de 0,42 a 0,74 para a variável raiz quadrada do diâmetro médio (Tabela 4.16), de 0,40 a 0,74 para a variável logaritmo do diâmetro médio (Tabela 4.17) e de 0,37 a 0,83 para a variável inverso do diâmetro médio (Tabela 4.18).

A configuração que resultou em modelos com melhor qualidade de ajuste foi a configuração V com valores R^2 e R^2 (Ajustado) de (0,74; 0,70), (0,74; 0,69), (0,74; 0,69), (0,74; 0,69) e (0,83; 0,78) para as variáveis diâmetro médio, quadrado do diâmetro médio, raiz quadrada do diâmetro médio, logaritmo do diâmetro médio e inverso do diâmetro médio, respectivamente. O melhor ajuste resultou da variável inverso do diâmetro médio. Para algumas das variáveis a configuração VII também propiciou qualidade de ajuste comparável com a obtida utilizando a configuração V.

TABELA 4.14 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM | | | | |
|-------------------------|-------|-------|------------------|---------------------------------------|
| Config. | R | R^2 | R^2 (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,657 | 0,431 | 0,384 | Constante, f_h10_inv |
| II | 0,819 | 0,671 | 0,612 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| III | 0,723 | 0,523 | 0,484 | Constante, f_h10_inv |
| IV | 0,802 | 0,643 | 0,579 | Constante, f_h10_inv, p702 |
| V | 0,862 | 0,744 | 0,697 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| VI | 0,697 | 0,486 | 0,443 | Constante, f_h10_inv |
| VII | 0,764 | 0,583 | 0,548 | Constante, f_h10_inv |
| VIII | 0,760 | 0,578 | 0,542 | Constante, p702 |

TABELA 4.15 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM² | | | | |
|--------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,671 | 0,450 | 0,404 | Constante, f_h10_inv |
| II | 0,824 | 0,678 | 0,620 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| III | 0,840 | 0,706 | 0,652 | Constante, f_h10_inv, p902 |
| IV | 0,823 | 0,678 | 0,619 | Constante, f_h10_inv, p702 |
| V | 0,861 | 0,740 | 0,693 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| VI | 0,711 | 0,506 | 0,465 | Constante, f_h10_inv |
| VII | 0,753 | 0,567 | 0,530 | Constante, f_h10_inv |
| VIII | 0,756 | 0,571 | 0,535 | Constante, p702 |

TABELA 4.16 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A, UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_sqrt | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,647 | 0,419 | 0,370 | Constante, f_h10_inv |
| II | 0,815 | 0,664 | 0,603 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| III | 0,714 | 0,510 | 0,469 | Constante, f_h10_inv |
| IV | 0,789 | 0,623 | 0,554 | Constante, f_h10_inv, p702 |
| V | 0,861 | 0,741 | 0,694 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| VI | 0,687 | 0,472 | 0,428 | Constante, f_h10_inv |
| VII | 0,849 | 0,722 | 0,671 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| VIII | 0,760 | 0,577 | 0,542 | Constante, p702 |

TABELA 4.17 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A, UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A LOGARITMO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_In | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,636 | 0,404 | 0,355 | Constante, f_h10_inv |
| II | 0,808 | 0,654 | 0,591 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| III | 0,703 | 0,494 | 0,452 | Constante, f_h10_inv |
| IV | 0,775 | 0,600 | 0,527 | Constante, f_h10_inv, p702 |
| V | 0,858 | 0,736 | 0,689 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| VI | 0,676 | 0,457 | 0,411 | Constante, f_h10_inv |
| VII | 0,858 | 0,736 | 0,688 | Constante, f_h10_inv, f_h10_In |
| VIII | 0,758 | 0,575 | 0,539 | Constante, p702 |

TABELA 4.18 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A, UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_inv | | | | |
|------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,610 | 0,370 | 0,32 | Constante, f_h10_inv |
| II | 0,873 | 0,762 | 0,69 | Constante, f_h10_inv, f_h10_ln, p50_sqrt |
| III | 0,676 | 0,457 | 0,411 | Constante, f_h10_inv |
| IV | 0,742 | 0,550 | 0,469 | Constante, f_h10_inv, p702 |
| V | 0,911 | 0,830 | 0,779 | Constante, f_h10_inv, f_h10_ln, f_h30_inv |
| VI | 0,649 | 0,421 | 0,372 | Constante, f_h10_inv |
| VII | 0,870 | 0,757 | 0,713 | Constante, f_h10_inv, f_h10_ln |
| VIII | 0,750 | 0,562 | 0,526 | Constante, p702 |

Em resumo, para a variável diâmetro médio e suas transformadas, os melhores resultados em termos de R²(ajustado) foram encontrados quando se utiliza a variável dependente inverso do diâmetro nas configurações V (~58 min de voo), com R²(ajustado) de 0,78, e VII (~17 min de voo), com R²(ajustado) de 0,71.

A Figura 4.8 mostra o gráfico relacionando a variável inverso do diâmetro médio (obtida dos dados do inventário) e o valor do inverso do diâmetro médio estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração V. A Figura 4.9 mostra o gráfico relacionando o valor do inverso do diâmetro médio residual (padronizado) e o valor do inverso do diâmetro médio estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração V. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram gráficos similares para a mesma variável utilizando a configuração VII.

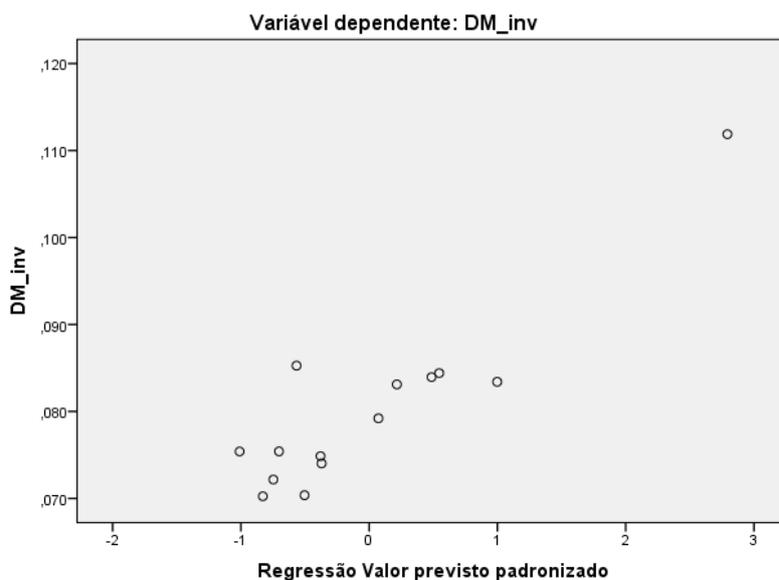


FIGURA 4.8 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE INVERSO DO DIÂMETRO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO DIÂMETRO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO V (PADRONIZADO)

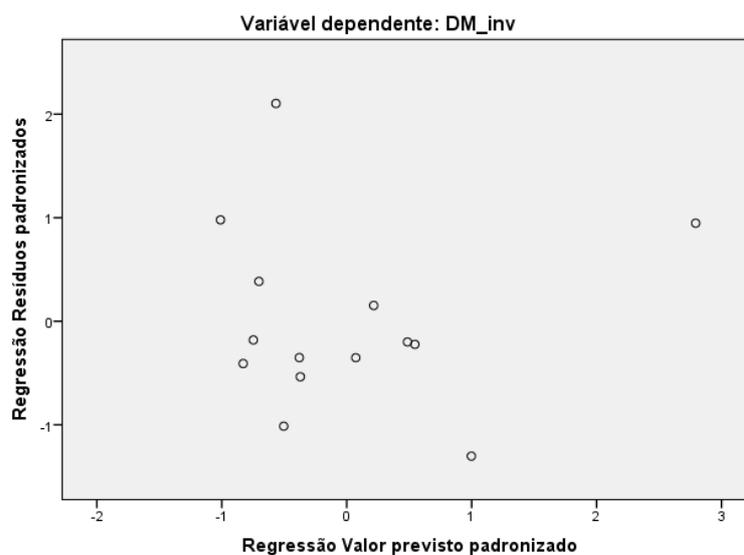


FIGURA 4.9 – EIXO VERTICAL: INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO RESÍDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO V (PADRONIZADO)

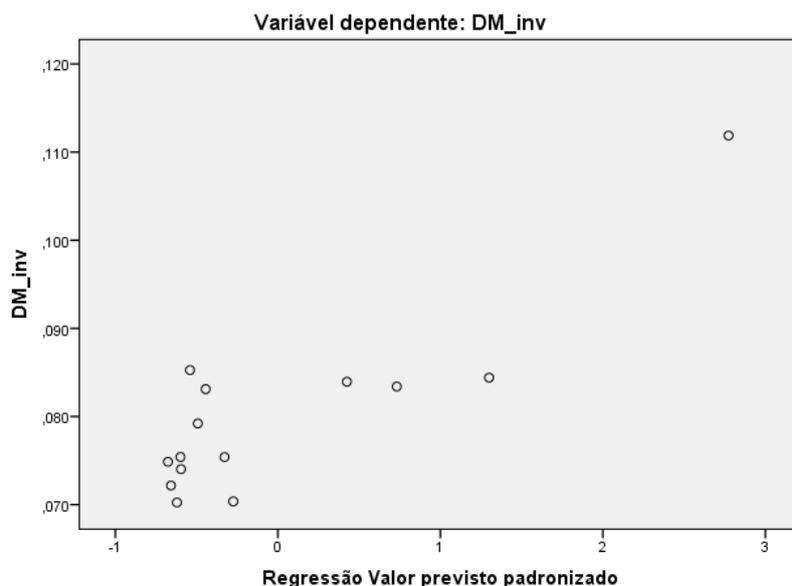


FIGURA 4.10 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE INVERSO DO DIÂMETRO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO DIÂMETRO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO)

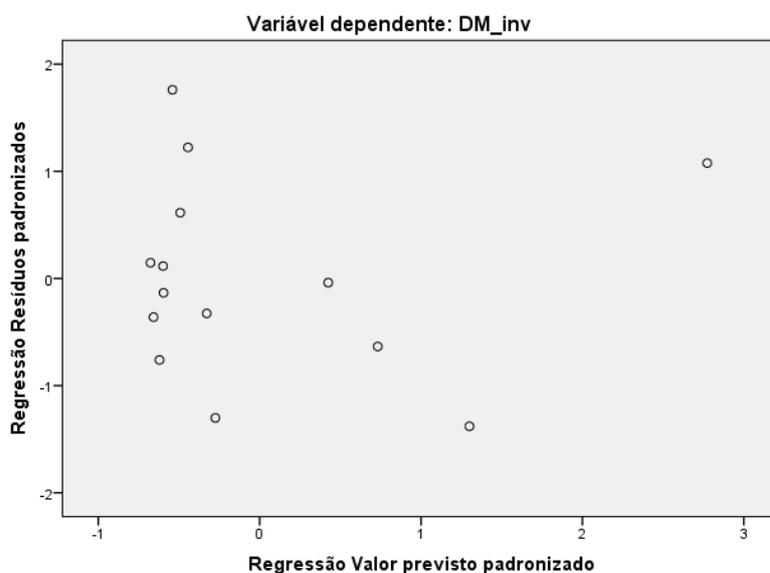


FIGURA 4.11 – EIXO VERTICAL: INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO RESÍDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO)

Altura Média e Transformadas

Os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado (R^2 [Ajustado]) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável

dependente a altura média e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso) são apresentados nas Tabelas 4.19 a 4.23. De maneira similar à variável diâmetro médio e suas transformadas, a variável altura média e suas transformadas resultaram em modelos com inferior qualidade de ajuste quando comparado com os resultados obtidos para a variável volume/ha e suas transformadas.

Para a variável altura média e suas transformadas também se observa expressiva variação na qualidade de ajuste para as diferentes configurações de voo com valores de R^2 variando de 0,45 a 0,74 para a variável altura média (Tabela 4.19), de 0,45 a 0,75 para a variável quadrado da altura média (Tabela 4.20), de 0,55 a 0,73 para a variável raiz quadrada da altura média (Tabela 4.21), de 0,44 a 0,73 para a variável logaritmo da altura média (Tabela 4.22) e de 0,43 a 0,72 para a variável inverso da altura média (Tabela 4.23).

A configuração que resultou em modelos com melhor qualidade de ajuste foi a configuração III com valores R^2 e R^2 [Ajustado] de (0,73; 0,69), (0,75; 0,70), (0,73; 0,69), (0,73; 0,68) e (0,71; 0,66) para as variáveis altura média, quadrado da altura média, raiz quadrada da altura média, logaritmo da altura média e inverso da altura média. Pode-se notar, entretanto, que a diferença na qualidade de ajuste obtida com a configuração VII é pequena quando comparada com a configuração III.

TABELA 4.19 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM | | | | |
|-------------------------|-------|-------|------------------|---------------------------------------|
| Config. | R | R^2 | R^2 (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,747 | 0,558 | 0,522 | Constante, f_Havg2 |
| II | 0,766 | 0,586 | 0,552 | Constante, f_Havg_inv |
| III | 0,860 | 0,739 | 0,692 | Constante, f_Havg2, p902 |
| IV | 0,755 | 0,570 | 0,535 | Constante, f_Havg2 |
| V | 0,810 | 0,657 | 0,628 | Constante, f_Havg2 |
| VI | 0,667 | 0,445 | 0,399 | Constante, f_Havg_inv |
| VII | 0,849 | 0,721 | 0,670 | Constante, f_Havg_inv, p70_inv |
| VIII | 0,753 | 0,567 | 0,531 | Constante, f_Havg2 |

TABELA 4.20 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM² | | | | |
|--------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,756 | 0,571 | 0,535 | Constante, f_Havg2 |
| II | 0,768 | 0,590 | 0,556 | Constante, f_Havg_sqrt |
| III | 0,866 | 0,749 | 0,704 | Constante, f_Havg2, p902 |
| IV | 0,768 | 0,589 | 0,555 | Constante, f_Havg2 |
| V | 0,820 | 0,673 | 0,646 | Constante, f_Havg2 |
| VI | 0,669 | 0,448 | 0,402 | Constante, f_Havg_inv |
| VII | 0,846 | 0,715 | 0,664 | Constante, f_Havg_inv, p70_inv |
| VIII | 0,756 | 0,572 | 0,536 | Constante, f_Havg2 |

TABELA 4.21 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM_sqrt | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,742 | 0,551 | 0,514 | Constante, f_Havg2 |
| II | 0,764 | 0,583 | 0,549 | Constante, f_Havg_inv |
| III | 0,856 | 0,733 | 0,685 | Constante, f_Havg2, p902 |
| IV | 0,748 | 0,560 | 0,523 | Constante, f_Havg2 |
| V | 0,804 | 0,647 | 0,618 | Constante, f_Havg2 |
| VI | 0,783 | 0,613 | 0,543 | Constante, f_Havg_inv, p902 |
| VII | 0,850 | 0,723 | 0,672 | Constante, f_Havg_inv, p70_inv |
| VIII | 0,751 | 0,563 | 0,527 | Constante, f_Havg2 |

TABELA 4.22 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM_In | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,737 | 0,543 | 0,505 | Constante, f_Havg2 |
| II | 0,762 | 0,580 | 0,545 | Constante, f_Havg_inv |
| III | 0,852 | 0,727 | 0,677 | Constante, f_Havg2, p902 |
| IV | 0,741 | 0,548 | 0,511 | Constante, f_Havg2 |
| V | 0,798 | 0,637 | 0,606 | Constante, f_Havg2 |
| VI | 0,663 | 0,440 | 0,393 | Constante, f_Havg_inv |
| VII | 0,851 | 0,724 | 0,674 | Constante, f_Havg_inv, p70_inv |
| VIII | 0,748 | 0,559 | 0,522 | Constante, f_Havg2 |

TABELA 4.23 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO A UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM_inv | | | | |
|------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,725 | 0,526 | 0,487 | Constante, f_Havg2 |
| II | 0,756 | 0,571 | 0,535 | Constante, f_Havg_inv |
| III | 0,843 | 0,711 | 0,659 | Constante, f_Havg2, p902 |
| IV | 0,724 | 0,524 | 0,485 | Constante, f_Havg2 |
| V | 0,783 | 0,613 | 0,581 | Constante, f_Havg2 |
| VI | 0,658 | 0,433 | 0,385 | Constante, f_Havg_inv |
| VII | 0,851 | 0,724 | 0,673 | Constante, f_Havg_inv, p70_inv |
| VIII | 0,741 | 0,548 | 0,511 | Constante, f_Havg2 |

Em resumo, extrai-se das tabelas acima que os melhores resultados em termos de R²(ajustado) para as diferentes variáveis dependentes testadas são muito próximos, variando de 0,66 a 0,70, sendo sempre encontrado o maior valor na configuração III, que corresponde a ~52 min de voo seguida da configuração VII (exceto para a variável inverso da altura), que corresponde a 17 min de voo.

A Figura 4.12 mostra o gráfico relacionando a variável quadrado da altura média (obtida dos dados do inventário) e o valor do quadrado da altura média estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração III. A Figura 4.13 mostra o gráfico relacionando o valor do quadrado da altura média residual e o valor do quadrado da altura média estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração III. As Figuras 4.14 e 4.15 mostram gráficos similares para a mesma variável utilizando a configuração VII.

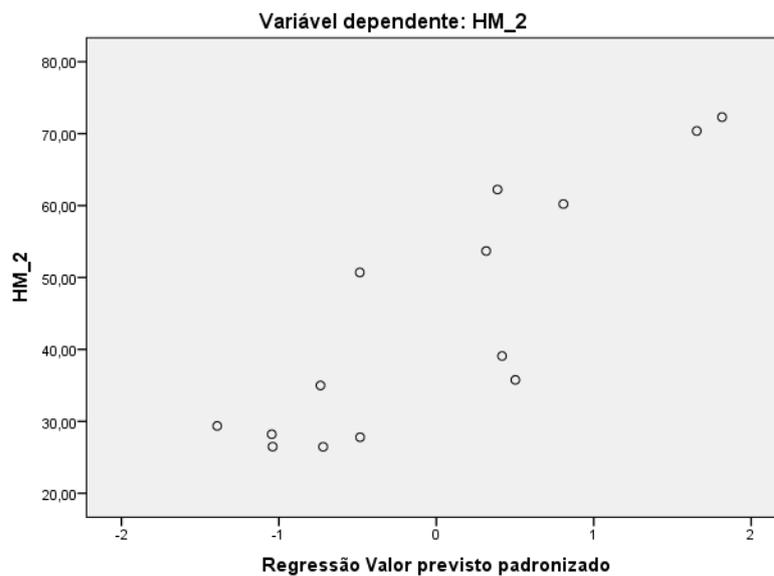


FIGURA 4.12 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE QUADRADO DA ALTURA OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: QUADRADO DA ALTURA ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO III (PADRONIZADO)

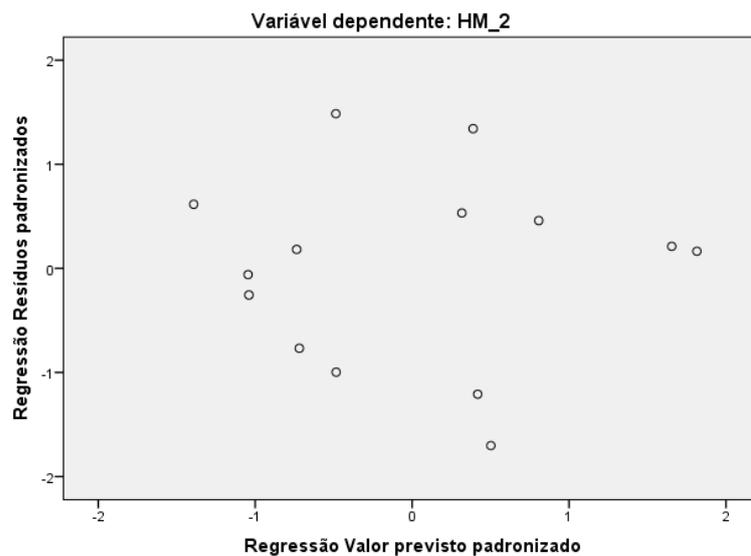


FIGURA 4.13 – EIXO VERTICAL: QUADRADO DA ALTURA RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: QUADRADO DA ALTURA ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO III (PADRONIZADO)

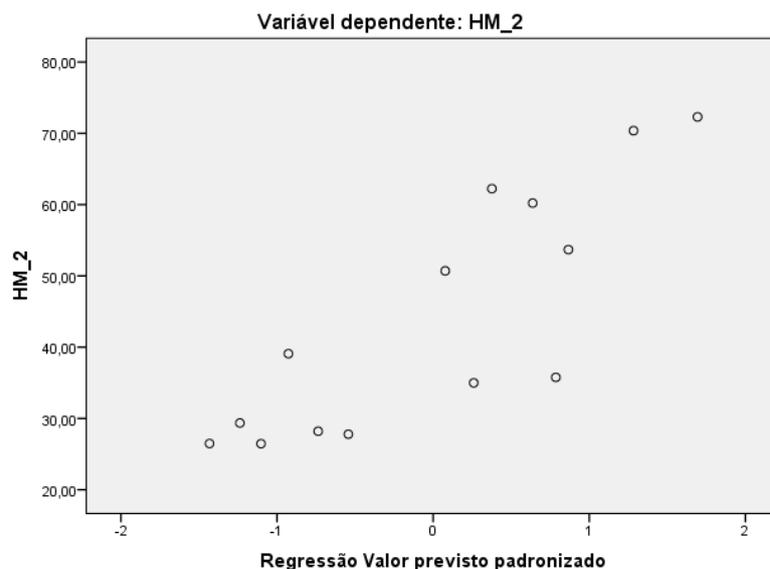


FIGURA 4.14 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE QUADRADO DA ALTURA OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: QUADRADO DA ALTURA ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO)

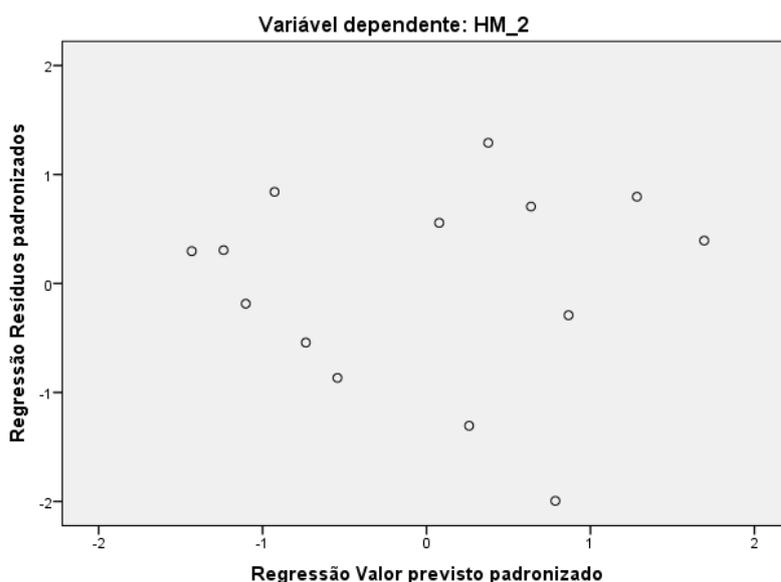


FIGURA 4.15 – EIXO VERTICAL: QUADRADO DA ALTURA RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: QUADRADO DA ALTURA ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VII (PADRONIZADO)

4.3.1.2 Resultados Talhão B (*Eucalyptus* Híbrido – 2006)

Volume/ha e Transformadas

Os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado (R^2 [Ajustado]) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável

dependente o volume/ha e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso) são apresentados nas Tabelas 4.24 a 4.28. Diferentemente dos resultados obtidos para o Talhão *A*, os modelos ajustados utilizando os dados do Talhão *B* resultaram em modelos com grande número de coeficientes, e, portanto, de variáveis independentes selecionadas. Desta forma, os coeficientes de determinação ajustado ($R^2[\text{Ajustado}]$) foram notavelmente menores que os coeficientes de determinação (R^2). Observa-se também que as diferentes configurações resultaram em modelos com qualidade de ajuste diferentes.

TABELA 4.24 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL | | | | |
|---------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,930 | 0,865 | 0,707 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,775 | 0,600 | 0,133 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,798 | 0,637 | 0,056 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,892 | 0,796 | 0,558 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,775 | 0,601 | 0,135 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,814 | 0,662 | 0,268 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,806 | 0,650 | 0,242 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,858 | 0,736 | 0,312 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.25 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL² | | | | |
|---------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,928 | 0,862 | 0,700 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,769 | 0,592 | 0,116 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,799 | 0,639 | 0,061 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,888 | 0,789 | 0,544 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,769 | 0,591 | 0,114 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,813 | 0,661 | 0,265 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,798 | 0,637 | 0,213 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,856 | 0,733 | 0,305 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.26 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_sqrt | | | | |
|--------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,931 | 0,866 | 0,709 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_ln, f_Hdesvio_ln, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,777 | 0,604 | 0,142 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_ln, p50, p70_ln, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,798 | 0,636 | 0,054 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,894 | 0,799 | 0,565 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_ln, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,779 | 0,606 | 0,147 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,814 | 0,663 | 0,269 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,811 | 0,657 | 0,257 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_ln, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,858 | 0,737 | 0,315 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.27 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_In | | | | |
|------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,931 | 0,867 | 0,712 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,780 | 0,608 | 0,151 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,797 | 0,636 | 0,052 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,896 | 0,803 | 0,572 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,782 | 0,612 | 0,159 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,815 | 0,663 | 0,271 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,815 | 0,664 | 0,271 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,859 | 0,738 | 0,318 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.28 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_inv | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,932 | 0,869 | 0,717 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,786 | 0,617 | 0,170 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,797 | 0,634 | 0,050 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,899 | 0,809 | 0,586 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,789 | 0,623 | 0,184 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,815 | 0,665 | 0,274 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,823 | 0,677 | 0,301 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,860 | 0,739 | 0,322 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

A configuração que resultou em melhor qualidade de ajuste para todas as variáveis dependentes foi a configuração I (~200 min de voo, R^2 [ajustado] de ~0,71) seguida pela configuração IV (~21 min de voo, R^2 [ajustado] de ~0,57).

A Figura 4.16 mostra o gráfico relacionando a variável volume (obtida dos dados do inventário) e o valor do volume estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração I. A Figura 4.17 mostra o gráfico relacionando o valor do volume residual e o valor do volume estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração I. As Figuras 4.18 e 4.19 mostram gráficos similares para a mesma variável utilizando a configuração IV.

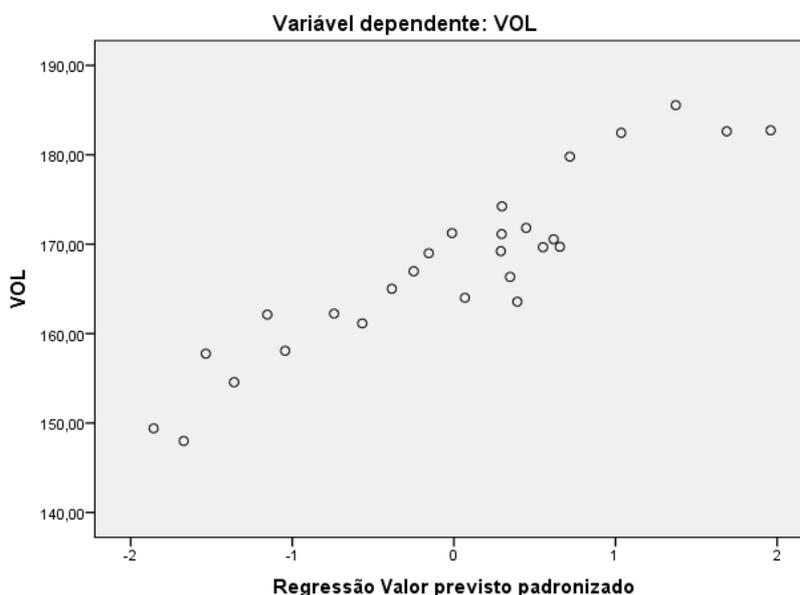


FIGURA 4.16 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I (PADRONIZADO)

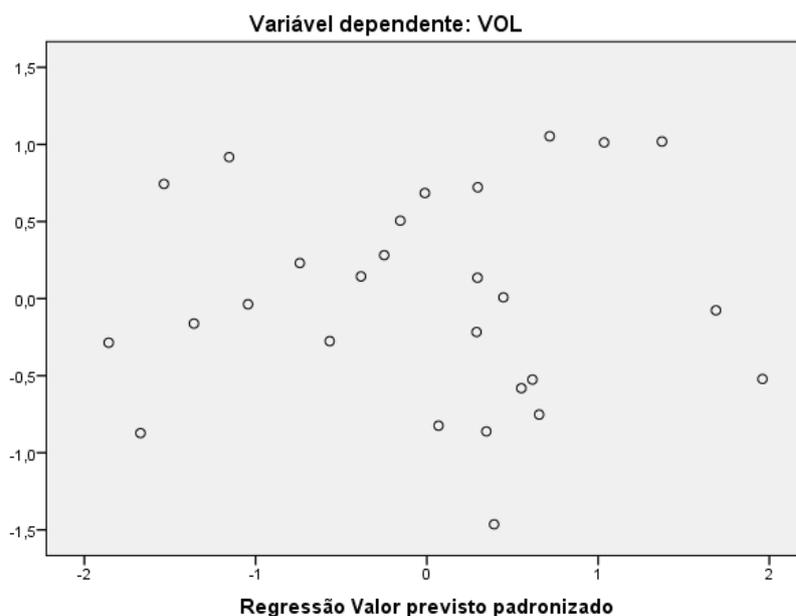


FIGURA 4.17 – EIXO VERTICAL: VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I (PADRONIZADO)

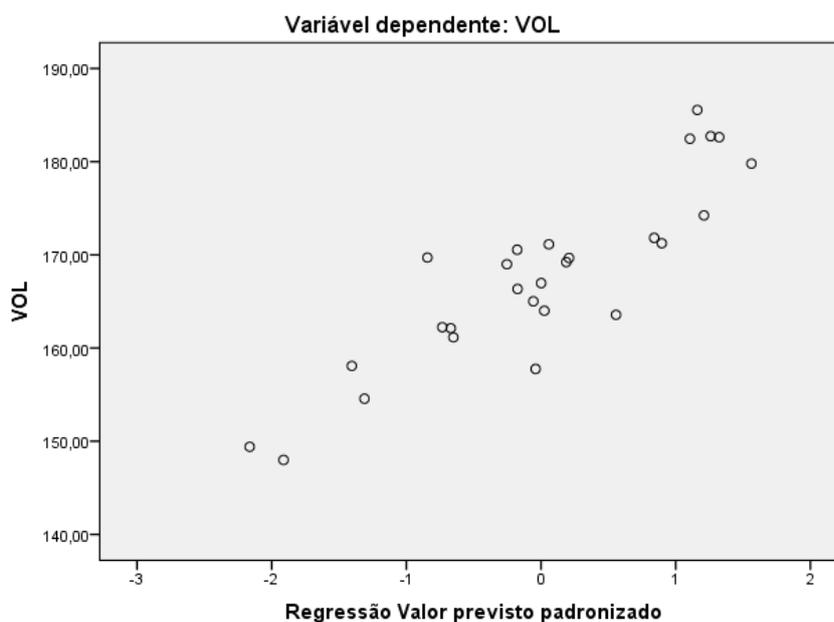


FIGURA 4.18 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE VOLUME OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)

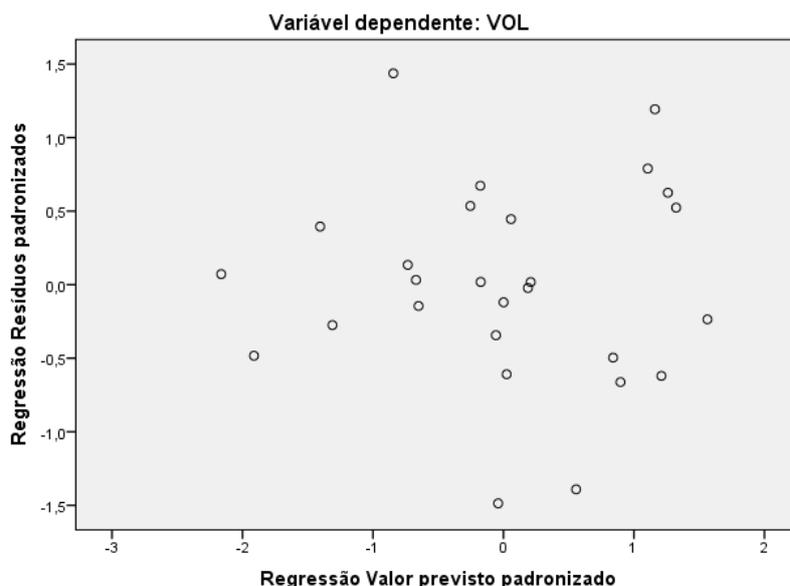


FIGURA 4.19 – EIXO VERTICAL: VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: VOLUME ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)

Diâmetro Médio e Transformadas

Os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado ($R^2[\text{Ajustado}]$) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável dependente o diâmetro médio e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso) são apresentados nas Tabelas 4.29 a 4.33. Nota-se que os modelos ajustados utilizando os dados do Talhão *B* resultaram em modelos com grande número de coeficientes, e, portanto, de variáveis independentes selecionadas. Desta forma, os coeficientes de determinação ajustado ($R^2[\text{Ajustado}]$) foram menores que os coeficientes de determinação (R^2).

TABELA 4.29 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM | | | | |
|--------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,878 | 0,770 | 0,503 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,608 | 0,370 | -0,365 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,829 | 0,687 | 0,187 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,841 | 0,707 | 0,365 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,749 | 0,562 | 0,050 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,750 | 0,563 | 0,052 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,736 | 0,541 | 0,006 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,823 | 0,678 | 0,162 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.30 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM² | | | | |
|--------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,878 | 0,770 | 0,503 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,610 | 0,372 | -0,362 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,827 | 0,684 | 0,179 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,841 | 0,707 | 0,364 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,750 | 0,562 | 0,052 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,753 | 0,567 | 0,062 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,735 | 0,540 | 0,003 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,826 | 0,682 | 0,173 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.31 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_sqrt | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,877 | 0,770 | 0,501 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_ln, f_Hdesvio_ln, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,608 | 0,369 | -0,367 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_ln, p50, p70_ln, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,830 | 0,689 | 0,191 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,841 | 0,707 | 0,365 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_ln, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,749 | 0,561 | 0,049 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,749 | 0,560 | 0,048 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,736 | 0,542 | 0,008 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_ln, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,822 | 0,676 | 0,157 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.32 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_In | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,877 | 0,769 | 0,499 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,607 | 0,368 | -0,368 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,831 | 0,691 | 0,195 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,841 | 0,707 | 0,366 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,749 | 0,561 | 0,049 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,747 | 0,558 | 0,043 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,737 | 0,543 | 0,010 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,821 | 0,674 | 0,151 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.33 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_inv | | | | |
|------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,876 | 0,767 | 0,496 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,606 | 0,367 | -0,371 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,833 | 0,694 | 0,204 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,841 | 0,708 | 0,367 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,749 | 0,561 | 0,048 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,744 | 0,553 | 0,032 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,738 | 0,545 | 0,015 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,818 | 0,670 | 0,142 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

Assim como ocorreu para a variável altura e suas transformadas, a configuração que resultou em melhor qualidade de ajuste para as variáveis diâmetro médio e suas transformadas foi a configuração I (~200min de voo e R^2 [ajustado] de 0,50) seguida pela configuração IV (~21 min de voo e R^2 [ajustado] de 0,37).

A Figura 4.20 mostra o gráfico relacionando a variável diâmetro médio (obtido dos dados do inventário) e o valor do diâmetro médio estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração I. A Figura 4.21 mostra o gráfico relacionando o valor do diâmetro médio residual e o valor do diâmetro médio estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração I. As Figuras 4.22 e 4.23 mostram gráficos similares para a mesma variável utilizando a configuração IV.

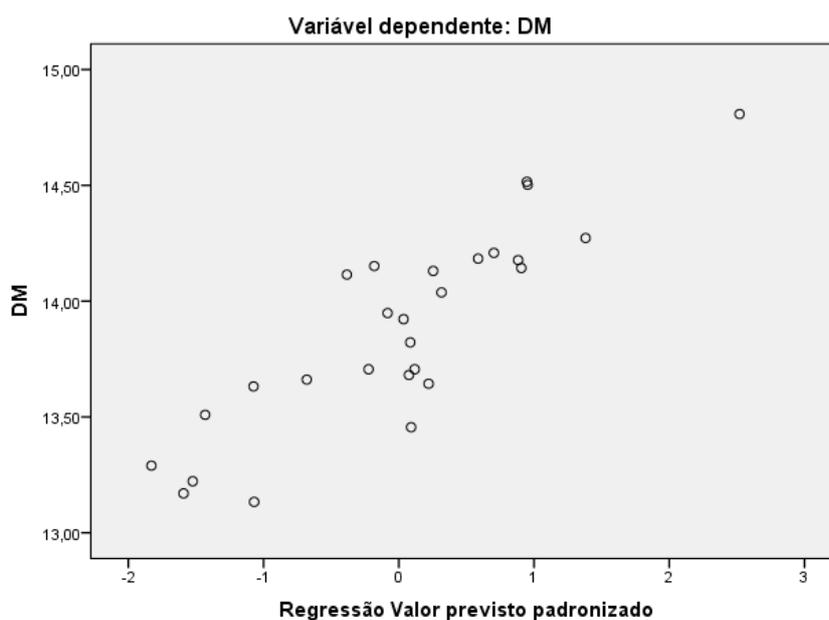


FIGURA 4.20 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE DIÂMETRO MÉDIO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I (PADRONIZADO)

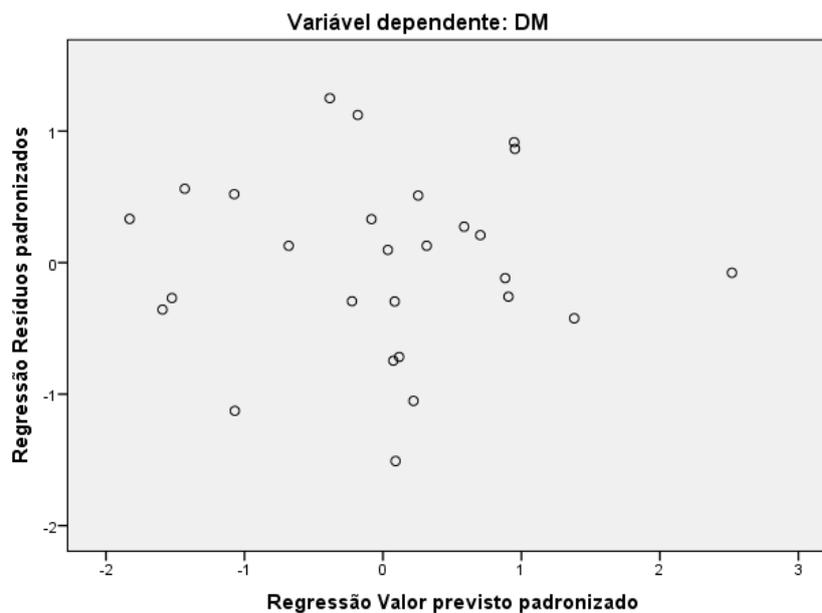


FIGURA 4.21 – EIXO VERTICAL: DIÂMETRO MÉDIO RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO I (PADRONIZADO)

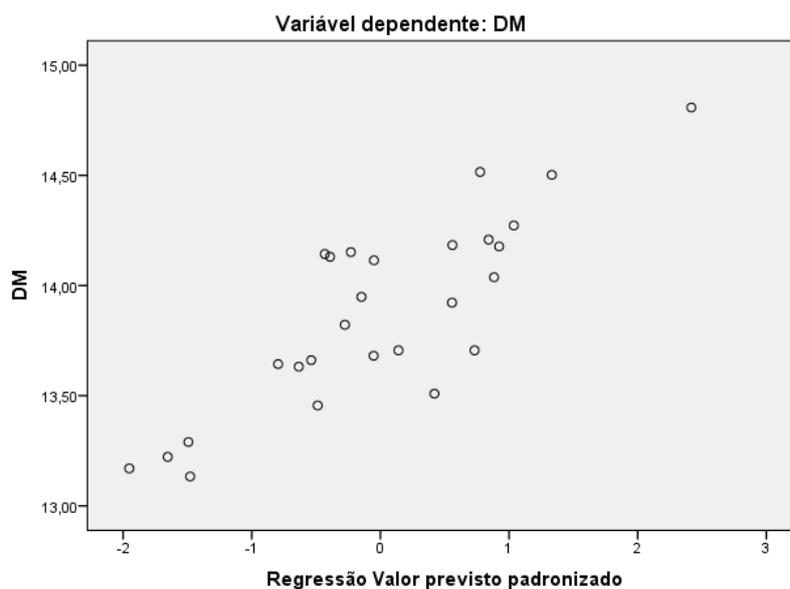


FIGURA 4.22 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE DIÂMETRO MÉDIO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)

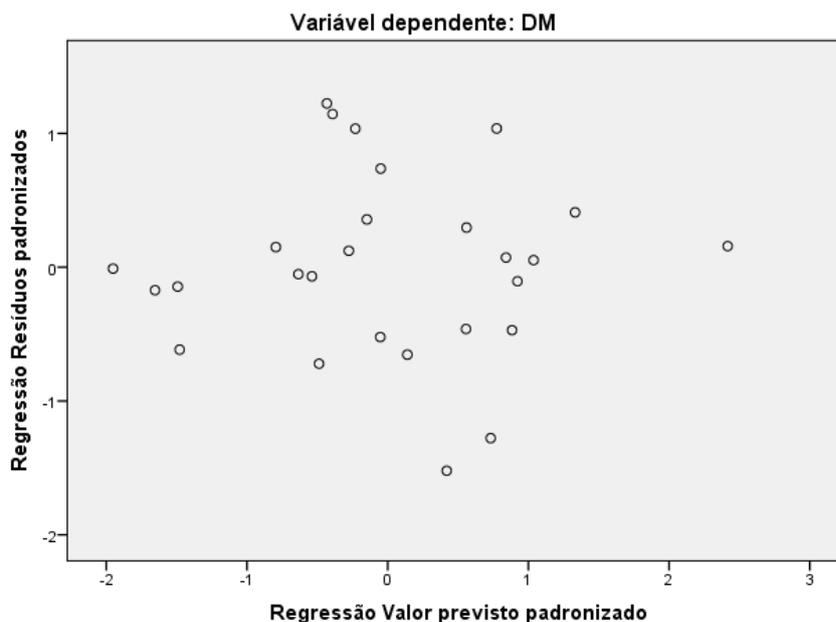


FIGURA 4.23 – EIXO VERTICAL: DIÂMETRO MÉDIO RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)

Altura Média e Transformadas

Os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado ($R^2[\text{Ajustado}]$) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável dependente a altura média e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso) são apresentados nas Tabelas 4.34 a 4.38. Novamente, os modelos ajustados utilizando os dados do Talhão *B* resultaram em modelos com grande número de coeficientes, resultando em coeficientes de determinação ajustado ($R^2[\text{Ajustado}]$) menores que os coeficientes de determinação (R^2). A configuração que resultou em melhor qualidade de ajuste para todas as variáveis dependentes foi a configuração IV (~21 min voo e $R^2[\text{ajustado}]$ de 0,27).

Os resultados (qualidade de ajuste) para a variável altura média e suas transformadas foram inferiores aos obtidos com as variáveis anteriores (volume/ha e diâmetro médio e transformadas) e apresentaram variação expressiva na qualidade de ajuste dos modelos gerados utilizando diferentes configurações.

TABELA 4.34 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM | | | | |
|--------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,777 | 0,604 | 0,141 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,507 | 0,257 | -0,609 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,798 | 0,636 | 0,054 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,813 | 0,662 | 0,267 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,675 | 0,456 | -0,178 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,630 | 0,396 | -0,308 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,720 | 0,519 | -0,043 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,791 | 0,626 | 0,028 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.35 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM² | | | | |
|--------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,779 | 0,606 | 0,147 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,507 | 0,258 | -0,609 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,795 | 0,632 | 0,043 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,813 | 0,660 | 0,264 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,677 | 0,458 | -0,175 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,634 | 0,402 | -0,296 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,719 | 0,517 | -0,046 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,793 | 0,629 | 0,035 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.36 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM² | | | | |
|--------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,776 | 0,602 | 0,138 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_ln, f_Hdesvio_ln, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,507 | 0,257 | -0,610 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_ln, p50, p70_ln, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,799 | 0,638 | 0,060 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,814 | 0,662 | 0,268 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_ln, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,675 | 0,455 | -0,180 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,628 | 0,394 | -0,314 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,721 | 0,519 | -0,041 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_ln, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,790 | 0,625 | 0,025 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.37 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM_In | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,775 | 0,601 | 0,135 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_In, f_Hdesvio_In, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,507 | 0,257 | -0,610 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_In, p50, p70_In, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,800 | 0,640 | 0,065 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,814 | 0,663 | 0,269 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_In, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,674 | 0,454 | -0,182 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,625 | 0,391 | -0,319 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,721 | 0,520 | -0,040 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_In, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,790 | 0,624 | 0,021 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

TABELA 4.38 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO B UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM_inv | | | | |
|------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,773 | 0,598 | 0,129 | Constante, p90_inv, f_h502, p70_ln, f_Hdesvio_ln, p50_inv, p30_sqrt, f_Hdesvio2, f_h902, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h102, f_h90_inv, p902 |
| II | 0,507 | 0,257 | -0,609 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_ln, p50, p70_ln, p10, f_h30_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio2, f_h702, f_h50_inv, f_h90_inv, f_h102, f_Havg2 |
| III | 0,803 | 0,645 | 0,076 | Constante, p90_inv, p30, p10_sqrt, p502, f_h30_inv, f_Hdesvio_inv, p70_inv, f_Hdesvio2, f_h902, f_h102, f_h502, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt, f_h90_inv, f_Havg_inv |
| IV | 0,815 | 0,664 | 0,272 | Constante, p90_inv, f_h902, f_Hdesvio_inv, p302, p50, p10_ln, f_Hdesvio2, f_h10_inv, f_h30_inv, f_h702, f_h502, f_h102, f_Havg_inv, f_h90_inv |
| V | 0,673 | 0,453 | -0,186 | Constante, p90_inv, p50_sqrt, p30_sqrt, f_Hdesvio_inv, f_h702, p70_sqrt, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h90_inv, f_h102, f_h502, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VI | 0,621 | 0,386 | -0,330 | Constante, p90_inv, p502, f_h90_inv, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_Hdesvio2, f_h30_inv, f_h102, f_h702, f_h50_inv, f_h70_inv, f_h10_inv, f_Havg_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VII | 0,722 | 0,522 | -0,036 | Constante, p90_inv, f_h90_inv, f_Hdesvio2, p30_ln, p50, p70_inv, f_Hdesvio_inv, f_h702, f_h50_inv, f_h102, f_h302, f_h10_inv, f_h902, f_Havg_inv |
| VIII | 0,788 | 0,621 | 0,014 | Constante, p90_inv, p10_inv, f_Hdesvio2, f_h902, p50_inv, p302, f_Hdesvio_inv, f_h50_inv, f_h702, f_h30_inv, f_h102, f_h302, f_Havg_inv, f_h90_inv, f_h10_inv, f_Hdesvio_sqrt |

A Figura 4.24 mostra o gráfico relacionando a variável altura média (obtido dos dados do inventário) e o valor da altura média estimada pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração IV. A Figura 4.25 mostra o gráfico relacionando o valor da altura média residual e o valor da altura média estimada pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração IV.

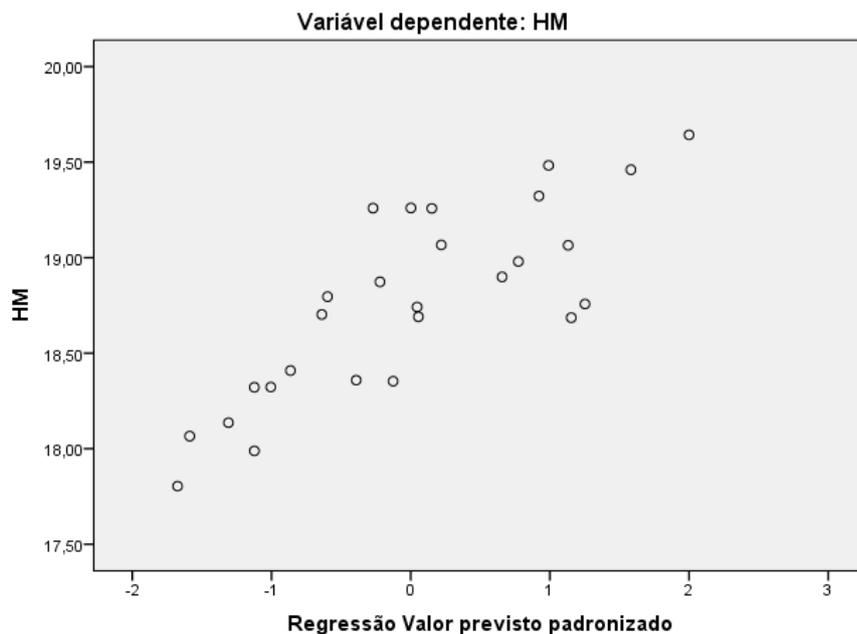


FIGURA 4.24 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ALTURA MÉDIA OBTIDA ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: ALTURA MÉDIA ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)

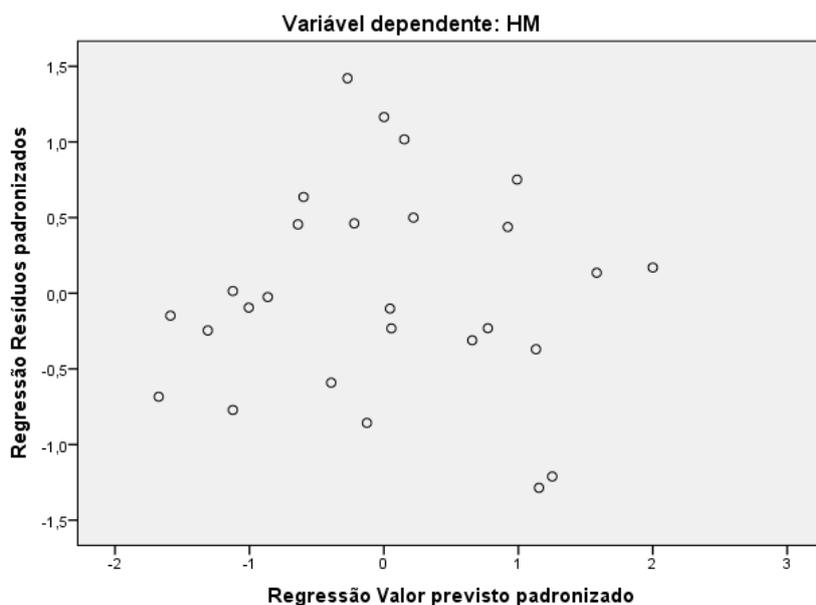


FIGURA 4.25 – EIXO VERTICAL: ALTURA MÉDIA RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ALTURA MÉDIA ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)

4.3.1.3 Resultados Talhão C (*Pinus taeda* – 1997)Volume/ha e Transformadas

Os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado (R^2 [Ajustado]) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável dependente o volume/ha e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso) são apresentados nas Tabelas 4.39 a 4.43.

Dentre os talhões investigados, o Talhão C (*Pinus taeda* – 1997) foi o que resultou em modelos com melhor qualidade de ajuste para a variável volume/ha e suas transformadas. A configuração que resultou em melhor qualidade de ajuste para todas as variáveis dependentes (volume/ha e suas transformadas) foi a configuração VI. Entretanto, nota-se que as demais configurações também resultaram em modelos com qualidade comparável de ajuste, ou seja, não houve variação expressiva na qualidade de ajuste para as diferentes configurações.

TABELA 4.39 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O VOLUME/HA

| Variável Dependente: Volume/HA | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|------------------|--------------------------------------|
| Config. | R | R^2 | R^2 (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,890 | 0,792 | 0,766 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h102 |
| II | 0,891 | 0,794 | 0,768 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| III | 0,849 | 0,720 | 0,704 | Constante, f_Hdesvio_inv |
| IV | 0,906 | 0,821 | 0,799 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h302 |
| V | 0,914 | 0,835 | 0,815 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| VI | 0,921 | 0,848 | 0,829 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| VII | 0,917 | 0,841 | 0,821 | Constante, f_h302, f_h90_inv |
| VIII | 0,907 | 0,823 | 0,801 | Constante, f_Hdesvio_inv, p70_inv |

TABELA 4.40 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL² | | | | |
|---------------------------------------------|----------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,846 | 0,715 | 0,698 | Constante, f_Hdesvio_inv |
| II | 0,829 | 0,687 | 0,669 | Constante, f_Hdesvio_inv |
| III | 0,841 | 0,707 | 0,690 | Constante, f_Hdesvio_inv |
| IV | 0,905 | 0,818 | 0,795 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h302 |
| V | 0,891 | 0,795 | 0,769 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h302 |
| VI | 0,924 | 0,854 | 0,836 | Constante, f_h302, f_h90_inv |
| VII | 0,885 | 0,783 | 0,755 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| VIII | 0,896 | 0,802 | 0,777 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h302 |

TABELA 4.41 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_sqrt | | | | |
|--------------------------------------|----------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,891 | 0,794 | 0,768 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h102 |
| II | 0,893 | 0,797 | 0,772 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| III | 0,897 | 0,804 | 0,780 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| IV | 0,904 | 0,817 | 0,794 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h302 |
| V | 0,915 | 0,838 | 0,817 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| VI | 0,941 | 0,886 | 0,872 | Constante, f_h302, f_h90_inv |
| VII | 0,920 | 0,846 | 0,827 | Constante, f_h302, f_h90_inv |
| VIII | 0,911 | 0,831 | 0,810 | Constante, f_Hdesvio_inv, p70_inv |

TABELA 4.42 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_In | | | | |
|------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,890 | 0,793 | 0,767 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h102 |
| II | 0,893 | 0,798 | 0,772 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| III | 0,896 | 0,802 | 0,778 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| IV | 0,871 | 0,758 | 0,744 | Constante, f_Hdesvio_inv |
| V | 0,915 | 0,836 | 0,816 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| VI | 0,943 | 0,889 | 0,875 | Constante, f_h302, f_h90_inv |
| VII | 0,921 | 0,847 | 0,828 | Constante, f_h302, f_h90_inv |
| VIII | 0,914 | 0,835 | 0,814 | Constante, f_Hdesvio_inv, p70_inv |

TABELA 4.43 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO VOLUME/HA

| Variável Dependente: VOL_inv | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,892 | 0,796 | 0,770 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| II | 0,888 | 0,789 | 0,763 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| III | 0,889 | 0,790 | 0,764 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| IV | 0,860 | 0,739 | 0,723 | Constante, f_Hdesvio_inv |
| V | 0,908 | 0,825 | 0,803 | Constante, f_Hdesvio_In, f_h302 |
| VI | 0,941 | 0,885 | 0,870 | Constante, f_h302, f_h90_inv |
| VII | 0,939 | 0,882 | 0,858 | Constante, f_h302, f_h90_inv, f_Hdesvio_sqrt |
| VIII | 0,922 | 0,851 | 0,832 | Constante, f_Hdesvio_In, p70_inv |

Em se tratando das variáveis dependentes que resultaram em modelos com melhor R²(Ajustado), têm-se as variáveis raiz quadrada do volume, logaritmo do volume e inverso do volume com R²(Ajustado) de 0,87, 0,88 e 0,87, respectivamente. Esses valores foram obtidos utilizando a configuração VI (~28 min de voo). É importante mencionar que de uma maneira geral todas as variáveis dependentes de volume resultaram em modelos com qualidade de ajuste similares.

A Figura 4.26 mostra o gráfico relacionando a variável raiz quadrada do volume (obtido dos dados do inventário) e o valor da raiz quadrada do volume estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração VI. A Figura 4.27 mostra o gráfico relacionando o valor da raiz quadrada do volume residual e o valor da raiz quadrada do volume estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração VI.

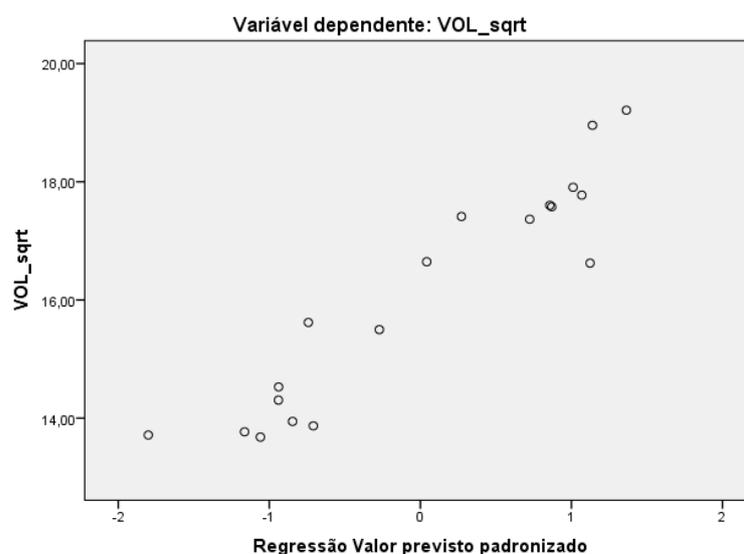


FIGURA 4.26 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE RAIZ QUADRADA DO VOLUME OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: RAIZ QUADRADA DO VOLUME ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VI (PADRONIZADO)

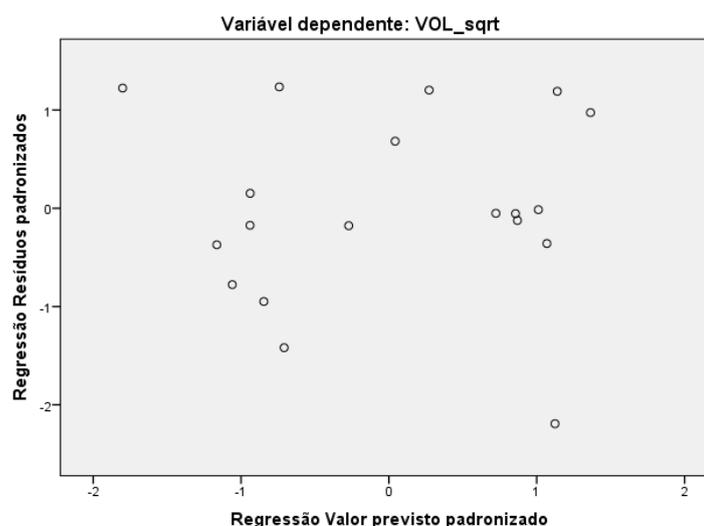


FIGURA 4.27 – EIXO VERTICAL: RAIZ QUADRADA DO VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: RAIZ QUADRADA DO VOLUME ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VI (PADRONIZADO)

Diâmetro Médio e Transformadas

Os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado (R^2 [Ajustado]) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável dependente o diâmetro médio e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso) são apresentados nas Tabelas 4.44 a 4.48.

Para a variável dependente diâmetro médio e suas transformadas, o Talhão C (*Pinus taeda* – 1997) também foi o que resultou em modelos com melhor qualidade de ajuste dentre os talhões investigados. As configurações que resultaram em melhor qualidade de ajuste para todas as variáveis dependentes de diâmetro foram as configurações VIII e IV. Entretanto, nota-se que outras configurações também resultaram em modelos com qualidade comparável de ajuste.

TABELA 4.44 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM | | | | |
|-------------------------|-------|-------|---------------------|---------------------------------------|
| Config. | R | R^2 | R^2 (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,886 | 0,785 | 0,758 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| II | 0,868 | 0,754 | 0,723 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| III | 0,881 | 0,776 | 0,748 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| IV | 0,890 | 0,793 | 0,767 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h10_inv |
| V | 0,868 | 0,754 | 0,723 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| VI | 0,870 | 0,757 | 0,727 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| VII | 0,835 | 0,697 | 0,679 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,895 | 0,801 | 0,777 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |

TABELA 4.45 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM² | | | | |
|--------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,877 | 0,769 | 0,740 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h102 |
| II | 0,858 | 0,736 | 0,703 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h10_In |
| III | 0,872 | 0,760 | 0,730 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h10_inv |
| IV | 0,912 | 0,832 | 0,798 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h10_inv, p10_inv |
| V | 0,867 | 0,752 | 0,721 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h30_inv |
| VI | 0,863 | 0,744 | 0,712 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| VII | 0,859 | 0,738 | 0,705 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| VIII | 0,888 | 0,789 | 0,762 | Constante, f_Hdesvio_inv, f_h10_inv |

TABELA 4.46 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_sqrt | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,889 | 0,790 | 0,763 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| II | 0,872 | 0,761 | 0,731 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| III | 0,885 | 0,784 | 0,757 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| IV | 0,890 | 0,792 | 0,766 | Constante, f_h10, f_Hdesvio_inv |
| V | 0,871 | 0,759 | 0,729 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| VI | 0,833 | 0,694 | 0,676 | Constante, f_h102 |
| VII | 0,843 | 0,711 | 0,694 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,898 | 0,807 | 0,783 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |

TABELA 4.47 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_In | | | | |
|----------------------------|-------|----------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Config. | R | R ² | R ² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,890 | 0,793 | 0,767 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| II | 0,875 | 0,766 | 0,737 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| III | 0,889 | 0,790 | 0,763 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| IV | 0,893 | 0,797 | 0,772 | Constante, f_h10_sqrt, f_Hdesvio_inv |
| V | 0,873 | 0,762 | 0,732 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| VI | 0,838 | 0,702 | 0,685 | Constante, f_h102 |
| VII | 0,850 | 0,722 | 0,706 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,900 | 0,811 | 0,787 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |

TABELA 4.48 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DO DIÂMETRO MÉDIO

| Variável Dependente: DM_inv | | | | |
|-----------------------------|-------|----------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Config. | R | R ² | R ² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,889 | 0,791 | 0,765 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| II | 0,879 | 0,773 | 0,745 | Constante, f_h10, f_Hdesvio_inv |
| III | 0,891 | 0,794 | 0,768 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |
| IV | 0,895 | 0,800 | 0,775 | Constante, f_h10_In, f_Hdesvio_inv |
| V | 0,836 | 0,699 | 0,681 | Constante, f_h10 |
| VI | 0,843 | 0,710 | 0,693 | Constante, f_h102 |
| VII | 0,858 | 0,737 | 0,721 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,900 | 0,810 | 0,786 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |

De uma maneira geral, todas as variáveis dependentes de diâmetro médio testadas resultaram em modelos com valores de R²(ajustado) similares para a configuração de melhor ajuste (configuração VIII) com valores de R²(ajustado) variando de 0,76 a 0,79.

A Figura 4.28 mostra o gráfico relacionando a variável diâmetro médio (obtido dos dados do inventário) e o valor do diâmetro médio estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração VIII. A Figura 4.29 mostra o gráfico relacionando o valor da raiz quadrada do volume residual e o valor da raiz quadrada do volume estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração VIII.

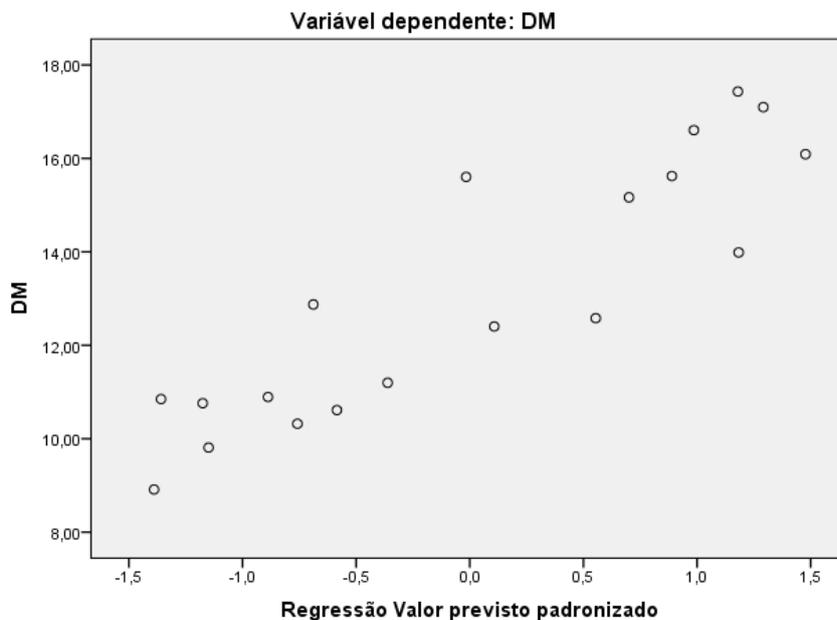


FIGURA 4.28 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE DIÂMETRO MÉDIO OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VIII (PADRONIZADO)

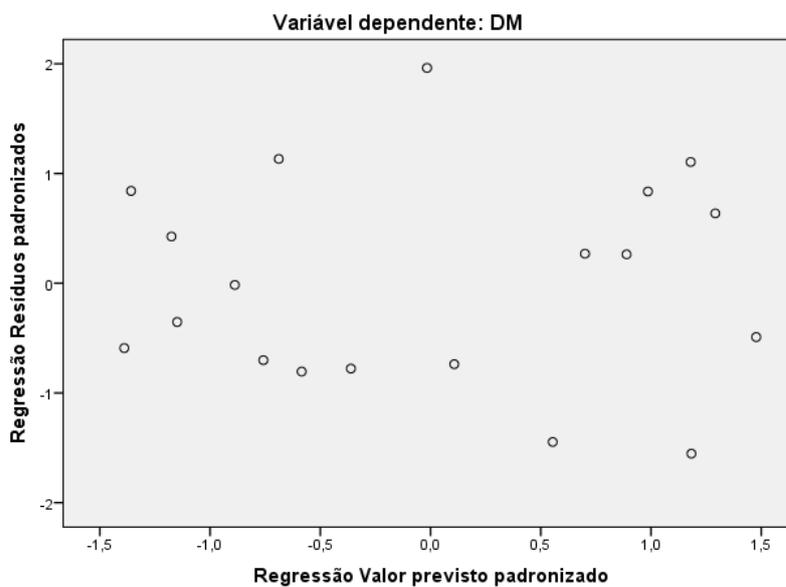


FIGURA 4.29 – EIXO VERTICAL: DIÂMETRO MÉDIO RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: DIÂMETRO MÉDIO ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO VIII (PADRONIZADO)

Altura Média e Transformadas

Os modelos ajustados e seus respectivos coeficientes de correlação (R), coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustado (R^2 [Ajustado]) para as diferentes configurações de voo utilizando como variável dependente a altura média e suas transformadas (quadrado, raiz quadrada, logaritmo e inverso) são apresentados nas Tabelas 4.49 a 4.53.

Para a variável dependente altura média e suas transformadas, o Talhão C (*Pinus taeda* – 1997) também foi o que resultou em modelos com melhor qualidade de ajuste dentre os talhões investigados.

As variáveis dependentes nas quais nota-se maiores variações na qualidade de ajuste foram as variáveis altura média (valores de R^2 variando de 0,61 a 0,84) e quadrado da altura média (valores de R^2 variando de 0,58 a 0,78). Para as demais variáveis, as diferentes configurações resultaram em modelos com qualidade de ajuste similar.

TABELA 4.49 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM | | | | |
|-------------------------|-------|-------|------------------|------------------------------------------------------|
| Config. | R | R^2 | R^2 (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,798 | 0,637 | 0,616 | Constante, f_h102 |
| II | 0,785 | 0,616 | 0,593 | Constante, f_h10_In |
| III | 0,802 | 0,643 | 0,622 | Constante, f_h10_In |
| IV | 0,916 | 0,840 | 0,794 | Constante, f_h10_inv, f_Hdesvio_inv, p10_inv, f_h102 |
| V | 0,783 | 0,613 | 0,590 | Constante, f_h10_sqrt |
| VI | 0,804 | 0,646 | 0,625 | Constante, f_h102 |
| VII | 0,815 | 0,664 | 0,644 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,856 | 0,733 | 0,700 | Constante, f_h10, f_Hdesvio_inv |

TABELA 4.50 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O QUADRADO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM² | | | | |
|--------------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,778 | 0,605 | 0,582 | Constante, f_h102 |
| II | 0,761 | 0,579 | 0,554 | Constante, f_h10_sqrt |
| III | 0,832 | 0,692 | 0,654 | Constante, f_h10, f_Hdesvio_inv |
| IV | 0,880 | 0,775 | 0,730 | Constante, f_h10_inv, f_Hdesvio_inv, p10_inv |
| V | 0,764 | 0,583 | 0,558 | Constante, f_h10 |
| VI | 0,788 | 0,621 | 0,599 | Constante, f_h102 |
| VII | 0,797 | 0,634 | 0,613 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,848 | 0,720 | 0,685 | Constante, f_h102, f_Hdesvio_inv |

TABELA 4.51 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE A RAIZ QUADRADA DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM_sqrt | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,807 | 0,651 | 0,630 | Constante, f_h102 |
| II | 0,795 | 0,633 | 0,611 | Constante, f_h10_In |
| III | 0,815 | 0,664 | 0,645 | Constante, f_h10_inv |
| IV | 0,806 | 0,649 | 0,629 | Constante, f_h10_inv |
| V | 0,791 | 0,626 | 0,604 | Constante, f_h10_sqrt |
| VI | 0,810 | 0,656 | 0,636 | Constante, f_h102 |
| VII | 0,822 | 0,677 | 0,657 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,820 | 0,673 | 0,654 | Constante, f_h10_sqrt |

TABELA 4.52 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O LOGARITMO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM_In | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Seleccionadas |
| I | 0,815 | 0,663 | 0,644 | Constante, f_h102 |
| II | 0,805 | 0,648 | 0,628 | Constante, f_h10_inv |
| III | 0,828 | 0,685 | 0,667 | Constante, f_h10_inv |
| IV | 0,818 | 0,669 | 0,649 | Constante, f_h10_inv |
| V | 0,798 | 0,637 | 0,615 | Constante, f_h10_In |
| VI | 0,815 | 0,664 | 0,644 | Constante, f_h102 |
| VII | 0,829 | 0,687 | 0,669 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,830 | 0,689 | 0,671 | Constante, f_h10_In |

TABELA 4.53 – MODELOS AJUSTADOS E SEUS RESPECTIVOS R, R², R²(AJUSTADO) PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VOO PARA O TALHÃO C UTILIZANDO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE O INVERSO DA ALTURA MÉDIA

| Variável Dependente: HM_inv | | | | |
|------------------------------------|----------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Config. | R | R² | R² (ajustado) | Variáveis Independentes Selecionadas |
| I | 0,826 | 0,682 | 0,663 | Constante, f_h10 |
| II | 0,821 | 0,674 | 0,655 | Constante, f_h10_inv |
| III | 0,850 | 0,723 | 0,706 | Constante, f_h10_inv |
| IV | 0,838 | 0,702 | 0,684 | Constante, f_h10_inv |
| V | 0,807 | 0,651 | 0,630 | Constante, f_h10_In |
| VI | 0,819 | 0,671 | 0,652 | Constante, f_h102 |
| VII | 0,837 | 0,701 | 0,683 | Constante, f_h102 |
| VIII | 0,847 | 0,717 | 0,700 | Constante, f_h10_inv |

A variável dependente altura média utilizando a configuração IV foi a que resultou em modelo com melhor qualidade de ajuste com valores de R² igual a 0,84 e de R²(Ajustado) igual a 0,79. O tempo de voo para essa configuração é de ~ 21 min.

A Figura 4.30 mostra o gráfico relacionando a variável altura média (obtido dos dados do inventário) e o valor da altura média estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração IV. A Figura 4.31 mostra o gráfico relacionando o valor da altura média residual e o valor da altura média estimado pelo modelo (padronizado) obtido para a configuração IV.

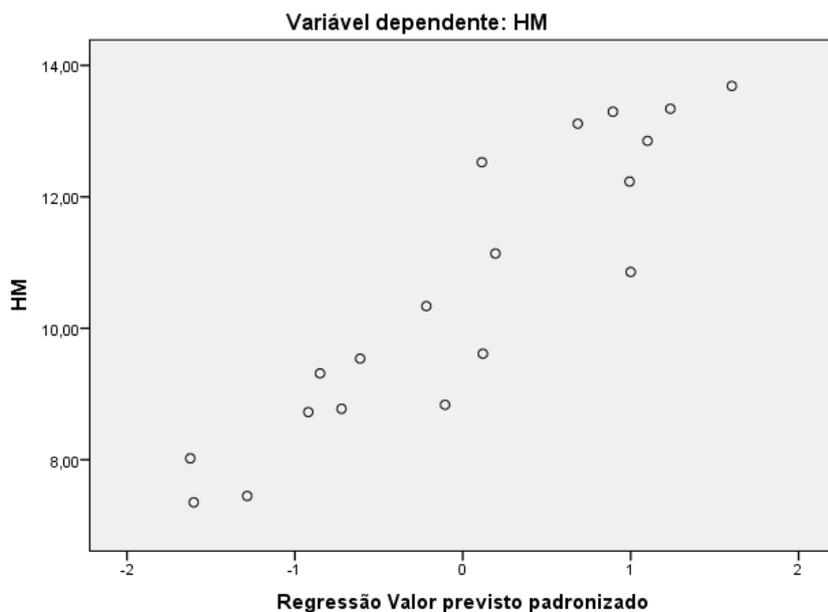


FIGURA 4.30 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ALTURA MÉDIA OBTIDO ATRAVÉS DOS DADOS DO INVENTÁRIO. EIXO HORIZONTAL: ALTURA MÉDIA ESTIMADA PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)

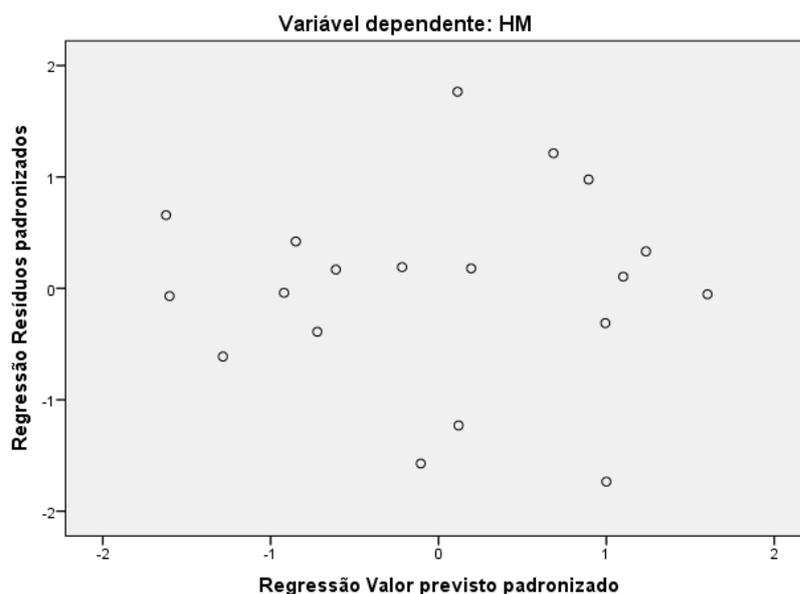


FIGURA 4.31 – EIXO VERTICAL: ALTURA MÉDIA RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ALTURA MÉDIA ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO UTILIZANDO CONFIGURAÇÃO IV (PADRONIZADO)

4.3.1.4 Análise do Impacto da Direção das Linhas de Voo

Com a finalidade de avaliar a influência da direção das linhas de voo na Abordagem em Nível de Parcela Amostral, parte do Talhão C foi sobrevoado em três diferentes direções de voo denominadas aqui de longitudinal (Figura 3.4a),

transversal (Figura 3.4b) e inclinada (Figura 3.4c) utilizando a configuração I. No total foram sobrevoadas cinco parcelas amostrais (parcelas 63, 64, 68, 70 e 74). O principal objetivo deste experimento foi o de verificar se as métricas extraídas do LIDAR (variáveis independentes) sofrem variação para uma dada configuração, quando diferentes direções de voo são utilizadas. Mais especificamente, pretende-se verificar se o modelo construído com dados utilizando uma determinada direção de voo é aplicável a dados coletados utilizando uma direção de voo diferente para uma dada configuração de voo.

Os dados coletados usando a direção longitudinal foram utilizados para ajuste do modelo (Tabelas 4.39 a 4.53). As variáveis independentes dos modelos ajustados (métricas extraídas do LIDAR) foram extraídas dos dados coletados utilizando as direções de voo transversal e inclinada (parcelas 63, 64, 68, 70 e 74) e utilizadas no cálculo das variáveis dependentes consideradas. O REMQ (%) foi então computado utilizando como referência as variáveis florestais estimadas utilizando as faixas longitudinais (Tabela 4.54).

Em se tratando da variável volume e suas transformadas, a direção transversal foi a que resultou em valores menores de REMQ (%) para todas as variáveis exceto para a variável transformada inverso do volume, a qual obteve valor de REMQ (%) de 22,40%. Pode-se observar de uma maneira geral que para as variáveis volume e suas transformadas voando-se na direção longitudinal ou na transversal não haverá variações significativas (inferiores a 5%), exceto para a variável inverso do volume. No caso da direção inclinada, variações na ordem de 10 a 12% foram observadas para as variáveis de volume e suas transformadas.

Para a variável altura média e suas transformadas, as duas direções de voo resultaram em valores de REMQ (%) inferiores a 5%, ou seja, não apresentaram variação significativa com os resultados obtidos a partir da direção longitudinal.

Para a variável diâmetro médio e suas transformadas, as variáveis que apresentaram maior estabilidade para as diferentes direções de voo foram as variáveis diâmetro e o logaritmo do diâmetro, com valores de REMQ (%) inferiores a 8%.

TABELA 4.54 – REMQ (%) DAS VARIÁVEIS COMPUTADAS COM DADOS DA CONFIGURAÇÃO I DIREÇÕES INCLINADA E TRANSVERSAL UTILIZANDO EQUAÇÕES AJUSTADAS A PARTIR DOS DADOS DA CONFIGURAÇÃO I DIREÇÃO LONGITUDINAL

| Variável Dependente do Modelo | Variáveis Independentes do Modelo | REMQ (%) | |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------|
| | | Direção Inclinada | Direção Transversal |
| Volume/HA | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 12,19 | 2,17 |
| (Volume/HA) ² | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 12,03 | 0,46 |
| SQRT(Volume/HA) | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 10,94 | 0,77 |
| LN(Volume/HA) | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 12,01 | 4,10 |
| INV(Volume/HA) | f_Hdesvio_inv, f_h302 | 10,22 | 22,40 |
| Altura Média | f_h102 | 2,41 | 3,71 |
| (Altura Média) ² | f_h102 | 2,70 | 4,91 |
| SQRT(Altura Média) | f_h102 | 2,47 | 3,45 |
| LN(Altura Média) | f_h102 | 3,02 | 4,00 |
| INV(Altura Média) | f_h10 | 0,74 | 2,67 |
| Diâmetro Médio | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 4,17 | 8,13 |
| (Diâmetro Médio) ² | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 28,71 | 20,36 |
| SQRT(Diâmetro Médio) | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 18,78 | 16,08 |
| LN(Diâmetro Médio) | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 3,31 | 4,75 |
| INV(Diâmetro Médio) | f_Hdesvio_inv, f_h102 | 28,77 | 33,18 |

4.3.2 Abordagem em Nível de Árvore Individual

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando a Abordagem em Nível de Árvore Individual para os diferentes talhões investigados neste trabalho de pesquisa. Os resultados para as diferentes configurações são avaliados em relação ao número de árvores automaticamente identificadas, altura individual e volume.

4.3.2.1 Resultados Talhão A (*Pinus taeda* – 2004)

A Tabela 4.55 e a Figura 4.32 mostram os resultados obtidos utilizando a Abordagem em Nível de Árvore Individual (resultados da identificação automática de árvores e comparação das alturas individuais e volume extraídos do LIDAR com os dados do inventário). Na Tabela 4.55 e na Figura 4.32 as configurações foram ordenadas pela densidade média de pontos do primeiro retorno. As configurações III e V resultaram em densidades bem próximas obtidas utilizando alturas de voo e ângulos de abertura diferentes. O mesmo ocorre para as configurações IV e VI, as quais produziram nuvem de pontos com densidades similares obtidas a partir de

diferentes alturas de voo e ângulos de abertura. Para estes casos, embora a densidade de pontos das configurações obtidas utilizando altura de voo de 2.000 m (configurações V e VI) tenham sido um pouco superior às configurações utilizando altura de voo de 700 m (configurações III e IV), o desempenho destas foi melhor. De uma forma geral, pode-se notar que resultados superiores (em termos da identificação automática das árvores, altura individual e volume) são obtidos com o aumento da densidade de pontos.

TABELA 4.55 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO A

| Config | Densidade de Pontos Primeiro Retorno (ppm ²) | Tempo de Voo (min) | Identificação das Árvores | | | Altura Individual | | | Volume |
|--------|----------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|
| | | | Acerto (%) | Erro de Comissão (%) | Erro de Omissão (%) | Erro Médio (%) | Desvio-Padrão (%) | REMQ (%) | Erro Absoluto (%) |
| I | 6,717 | 199,66 | 93,8 | 1,3 | 6,2 | -2,26 | 9,11 | 9,39 | 5,7 |
| II | 3,864 | 106,83 | 89,6 | 1,2 | 10,4 | -4,18 | 9,24 | 10,14 | 10,19 |
| V | 2,51 | 58,74 | 85,7 | 1 | 14,3 | -9,10 | 8,90 | 12,72 | 18,09 |
| III | 2,081 | 52,37 | 88,3 | 2,2 | 11,7 | -6,78 | 9,05 | 11,31 | 13,19 |
| VI | 1,382 | 28,01 | 80,7 | 2 | 19,3 | -11,21 | 9,54 | 14,72 | 23,88 |
| IV | 1,152 | 20,89 | 79,8 | 1,5 | 20,2 | -9,07 | 9,52 | 13,15 | 20,67 |
| VII | 0,827 | 16,97 | 74,6 | 0,3 | 25,4 | -12,85 | 8,93 | 15,65 | 28,97 |
| VIII | 0,482 | 7,90 | 52,3 | 0 | 47,7 | -14,14 | 9,20 | 16,87 | 46,71 |

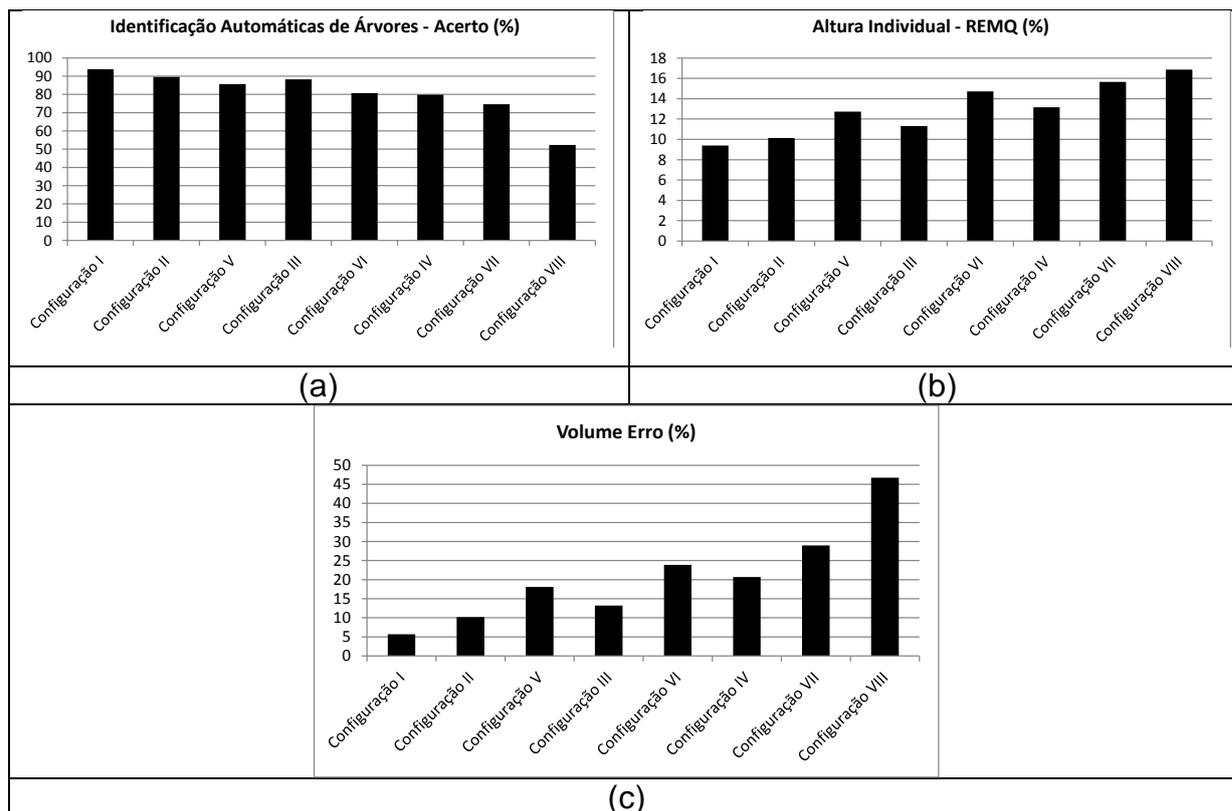


FIGURA 4.32 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO A

A partir dos dados mostrados na Tabela 4.55 foi construído modelo relacionando o erro absoluto no volume e as variáveis densidade, altura de voo e ângulo de abertura. O modelo ajustado é mostrado na Equação 4.1. A análise estatística para o modelo ajustado (coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação R^2 , coeficiente de determinação ajustado R^2 (ajustado) e erro padrão da estimativa (S_{xy}) é apresentada na Tabela 4.56.

$$\begin{aligned}
 \text{Erro Volume Absoluto (\%)} \\
 = -18,792377 + 1,388888 * \text{densidade} + 0,015358 \\
 * \text{altura}_{\text{voo}} + 1,548902 * \text{ângulo}_{\text{abertura}}
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

TABELA 4.56 – VALORES DE R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) E S_{xy} PARA O MODELO AJUSTADO RELACIONANDO O ERRO ABSOLUTO NO VOLUME E AS VARIÁVEIS DENSIDADE DE PONTOS, ALTURA DE VOO E ÂNGULO DE ABERTURA

| R | R^2 | R^2 (ajustado) | S_{xy} (%) |
|-------|-------|------------------|--------------|
| 0,978 | 0,957 | 0,925 | 3,52 |

A Figura 4.33 mostra o gráfico relacionando a erro absoluto no volume (%) (obtido através dos experimentos realizados) e o valor do erro absoluto no volume (padronizado) estimado pelo modelo. A Figura 4.34 mostra o gráfico relacionando o valor do erro absoluto no volume residual e o valor do erro absoluto no volume (padronizado) estimado pelo modelo.

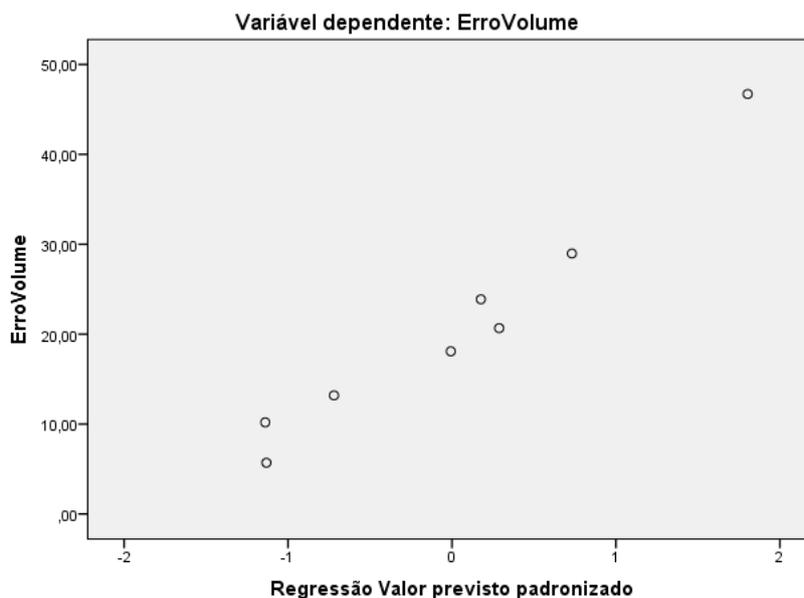


FIGURA 4.33 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ERRO VOLUME ABSOLUTO (%) OBTIDO ATRAVÉS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS. EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO

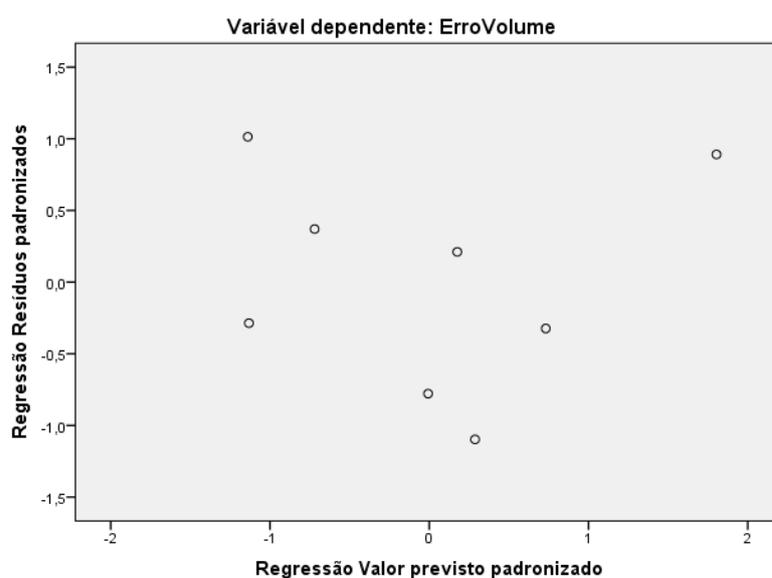


FIGURA 4.34 – EIXO VERTICAL: ERRO VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO

4.3.2.2 Resultados Talhão B (*Eucalyptus* Híbrido – 2006)

Nos resultados de detecção automática de árvores no Talhão B, pôde-se notar que para todas as configurações investigadas as parcelas 24 e 25 tiveram desempenho inferior. Para ilustrar, a Tabela 4.57 mostra os resultados por parcela para a configuração I. Observa-se na Figura 4.35 que as árvores não detectadas na parcela 24 correspondem a árvores dominadas. A não detecção dessas árvores deve-se ao fato das mesmas não formarem um máximo local. A formação de máximos locais é uma das hipóteses do método de detecção automática de árvores que foi utilizado.

TABELA 4.57 – RESULTADOS DA IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES PARA O TALHÃO B UTILIZANDO DADOS DA CONFIGURAÇÃO I

| Configuração I | | | |
|----------------|-------------|----------------------|---------------------|
| Parcela | Acerto (%) | Erro de Comissão (%) | Erro de Omissão (%) |
| 20 | 95,8 | 0,0 | 4,2 |
| 22 | 97,9 | 0,0 | 2,1 |
| 24 | 86,0 | 0,0 | 14,0 |
| 25 | 74,0 | 0,0 | 26,0 |
| 26 | 95,7 | 0,0 | 4,3 |
| 27 | 97,9 | 0,0 | 2,1 |
| 28 | 100,0 | 2,0 | 0,0 |
| 29 | 100,0 | 0,0 | 0,0 |
| 30 | 98,0 | 0,0 | 2,0 |
| 32 | 94,0 | 0,0 | 6,0 |
| 33 | 98,0 | 2,0 | 2,0 |
| 35 | 100,0 | 0,0 | 0,0 |
| 36 | 100,0 | 0,0 | 0,0 |
| 37 | 100,0 | 0,0 | 0,0 |
| 39 | 98,0 | 0,0 | 2,0 |
| 40 | 96,0 | 0,0 | 4,0 |
| 41 | 98,0 | 0,0 | 2,0 |
| 44 | 95,8 | 0,0 | 4,2 |
| 45 | 95,9 | 0,0 | 4,1 |
| 46 | 100,0 | 0,0 | 0,0 |
| TOTAL | 96,1 | 0,2 | 3,9 |

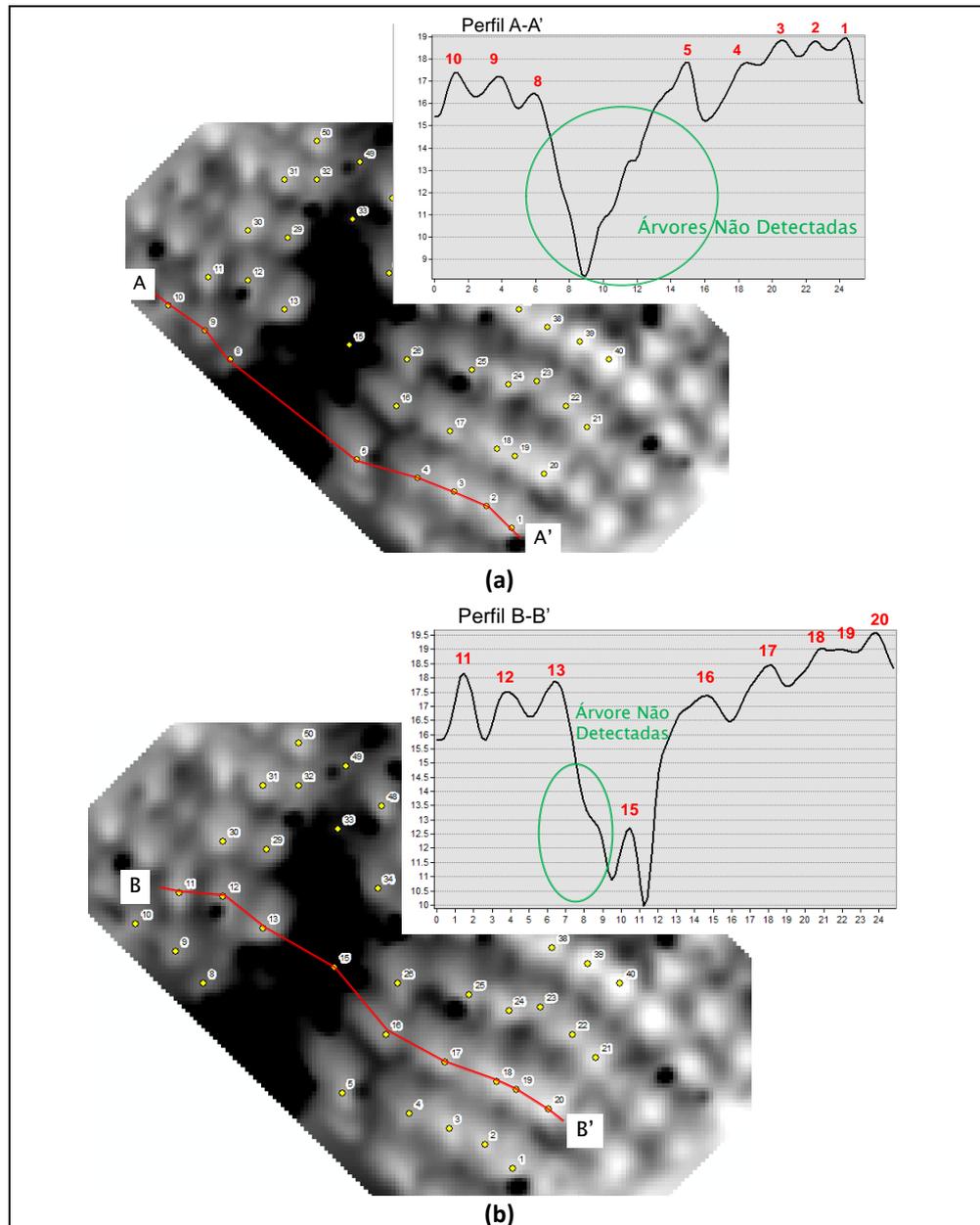


FIGURA 4.35 – ÁRVORES NÃO DETECTADAS NA PARCELA 24 DO TALHÃO B

A Tabela 4.58 e a Figura 4.36 mostram os resultados da Abordagem em Nível de Árvore Individual para as diferentes configurações no Talhão *B*. Assim como foi feito para o Talhão *A*, na Tabela 4.58 e na Figura 4.36 as configurações foram ordenadas pela densidade média de pontos do primeiro retorno. Nota-se que as configurações III e V que foram obtidas utilizando alturas de voo e ângulos de abertura diferentes, resultaram em densidades bem próximas. Da mesma forma, as configurações IV e VI, também produziram nuvem de pontos com similar densidade. Observa-se que diferentemente do que ocorreu para o Talhão *A*, neste caso, a configuração V resultou em melhor desempenho que a configuração III, a qual foi obtida utilizando altura menor de voo. Isto se explica pela presença do vento no Talhão *B* durante a coleta de dados das configurações II e III, degradando, portanto, o desempenho da configuração III. Para as configurações IV e VI, da mesma forma como ocorreu com o Talhão *A*, a configuração IV (obtida a partir de menor altura de voo) foi a que apresentou melhor desempenho.

De uma forma geral, pode-se notar que resultados superiores (em termos da identificação automática das árvores, altura individual e volume) são obtidos com o aumento da densidade de pontos.

TABELA 4.58 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO *B*

| Config. | Densidade de Pontos Primeiro Retorno (ppm ²) | Tempo de Voo (min) | Identificação das Árvores | | | Altura Individual | | | Volume |
|---------|----------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|
| | | | Acerto (%) | Erro de Comissão (%) | Erro de Omissão (%) | Erro Médio (%) | Desvio-Padrão (%) | REMQ (%) | Erro Absoluto (%) |
| I | 7,41 | 199,6648 | 96,1 | 0,2 | 3,9 | 0,98 | 2,29 | 2,49 | 0,79 |
| II | 4,50 | 106,8342 | 95,1 | 0,0 | 4,9 | 0,10 | 2,31 | 2,32 | 2,11 |
| III | 2,49 | 52,3695 | 91,9 | 0,6 | 8,1 | -1,20 | 3,09 | 3,31 | 6,54 |
| V | 2,45 | 58,74452 | 93,8 | 0,1 | 6,2 | -1,16 | 2,28 | 2,56 | 4,59 |
| IV | 1,45 | 20,8881 | 91,8 | 0,8 | 8,2 | -1,14 | 2,76 | 2,99 | 6,09 |
| VI | 1,36 | 28,00812 | 89,5 | 0,9 | 10,5 | -2,37 | 2,77 | 3,65 | 9,12 |
| VII | 0,85 | 16,9668 | 83,1 | 0,2 | 16,9 | -2,51 | 2,89 | 3,83 | 14,83 |
| VIII | 0,47 | 7,89995 | 58,8 | 0,2 | 41,2 | -1,71 | 5,09 | 5,37 | 39,82 |

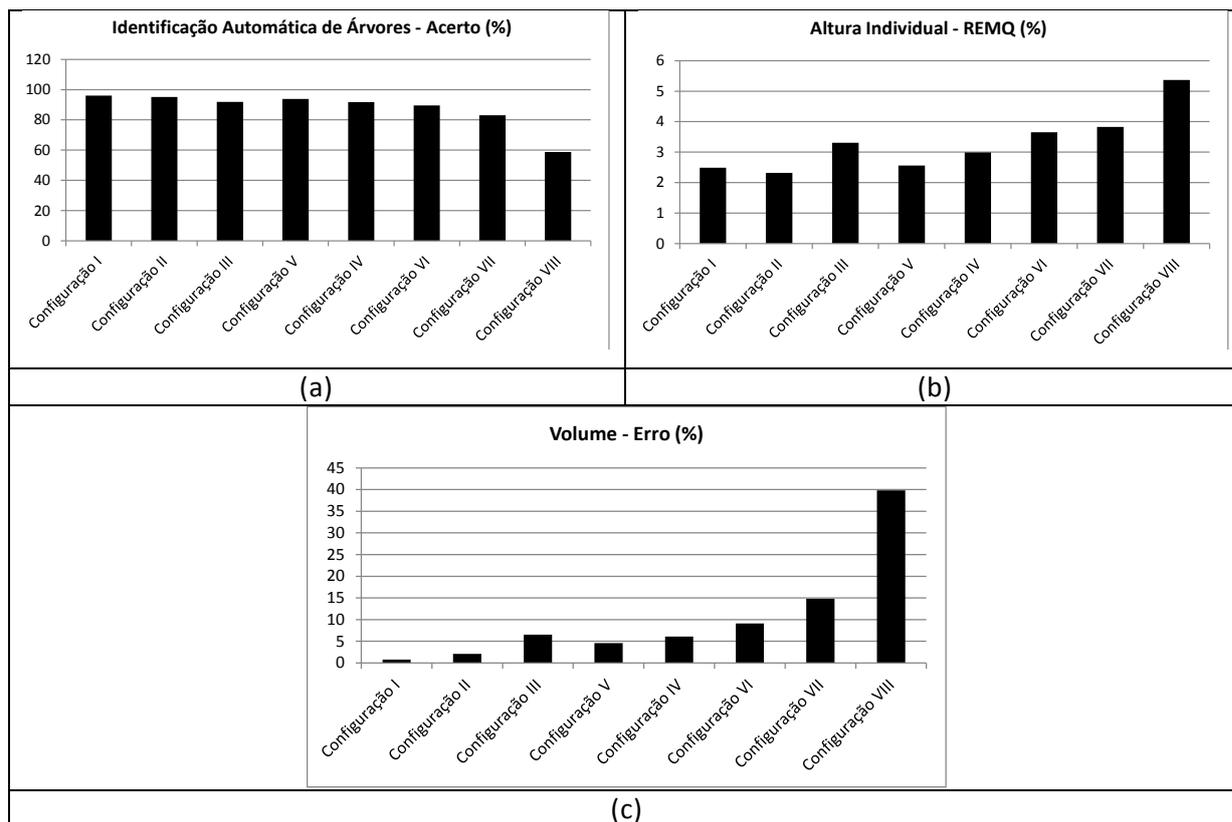


FIGURA 4.36 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO B

A partir dos dados mostrados na Tabela 4.58 foi construído modelo relacionando o erro absoluto no volume e as variáveis densidade, altura de voo e ângulo de abertura. O modelo ajustado é mostrado na Equação 4.2. A análise estatística para o modelo ajustado (coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação R^2 , coeficiente de determinação ajustado R^2 (ajustado) e erro padrão da estimativa (S_{xy})) é apresentada na Tabela 4.59.

Erro Volume Absoluto (%)

$$= -41,413759 + 3,413232 * \text{densidade} + 0,017192 * \text{altura}_{\text{voo}} + 1,949819 * \text{ângulo}_{\text{abertura}} \quad (4.2)$$

TABELA 4.59 VALORES DE R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) E S_{xy} PARA O MODELO AJUSTADO RELACIONANDO O ERRO ABSOLUTO NO VOLUME E AS VARIÁVEIS DENSIDADE DE PONTOS, ALTURA DE VOO E ÂNGULO DE ABERTURA

| R | R^2 | R^2 (ajustado) | S_{xy} (%) |
|-------|-------|------------------|--------------|
| 0,911 | 0,830 | 0,703 | 6,88 |

A Figura 4.37 mostra o gráfico relacionando a erro absoluto no volume (%) (obtido através dos experimentos realizados) e o valor do erro absoluto no volume (padronizado) estimado pelo modelo. A Figura 4.38 mostra o gráfico relacionando o valor do erro absoluto no volume residual e o valor do erro absoluto no volume (padronizado) estimado pelo modelo.

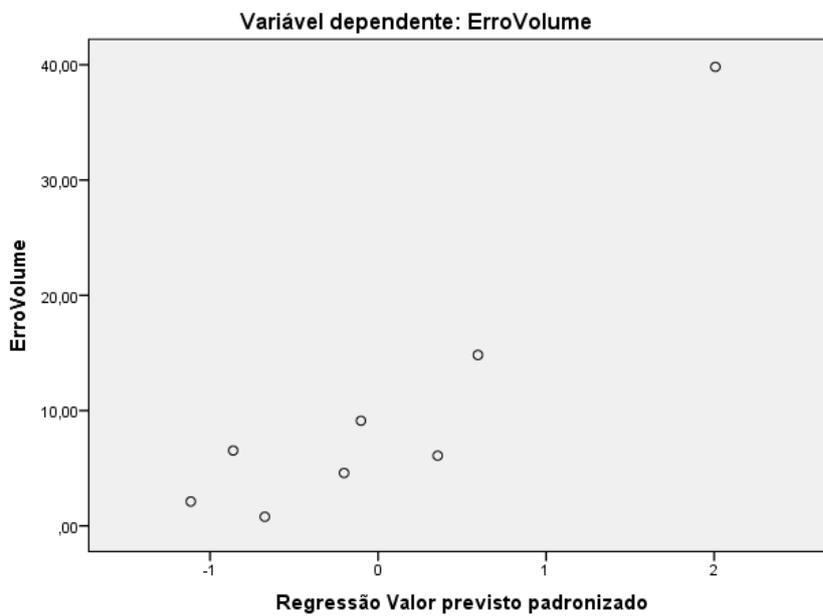


FIGURA 4.37 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ERRO VOLUME ABSOLUTO (%) OBTIDO ATRAVÉS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS. EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO

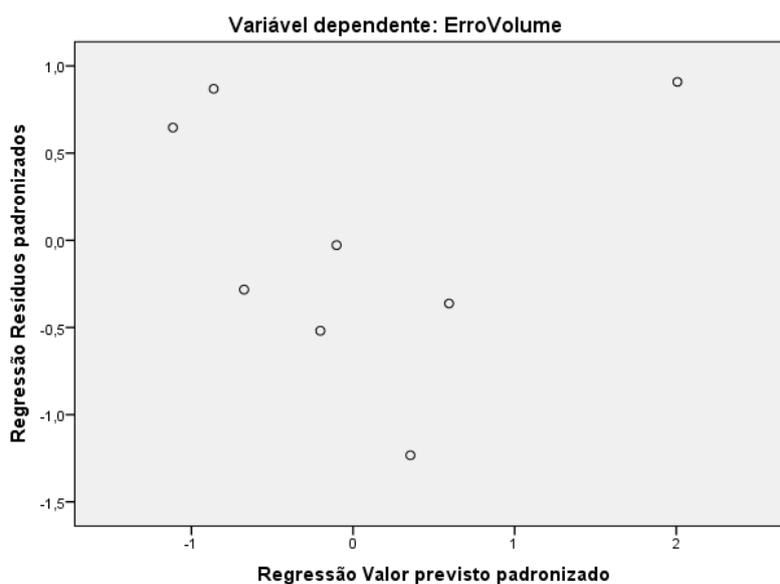


FIGURA 4.38 – EIXO VERTICAL: ERRO VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO

4.3.2.3 Resultados Talhão C (*Pinus taeda* – 1997)

A Tabela 4.60 e a Figura 4.39 mostram os resultados obtidos utilizando a Abordagem em Nível de Árvore Individual para as diferentes configurações no Talhão C. Para os resultados apresentados, as configurações foram ordenadas pela densidade média de pontos do primeiro retorno. Conforme ocorreu para os talhões A e B, as configurações III e V e as configurações IV e VI resultaram em densidades próximas, as quais foram obtidas utilizando alturas de voo e ângulos de abertura diferentes. Para os dois casos, as configurações utilizando menor altura de voo resultaram em melhor desempenho.

De uma forma geral, assim como observado para os demais talhões, resultados superiores (em termos da identificação automática das árvores, altura individual e volume) são obtidos com o aumento da densidade de pontos.

TABELA 4.60 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO C

| Config. | Densidade de Pontos Primeiro Retorno (ppm ²) | Tempo de Vôo (min) | Identificação das Árvores | | | Altura Individual | | | Volume |
|---------|----------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|
| | | | Acerto (%) | Erro de Comissão (%) | Erro de Omissão (%) | Erro Médio (%) | Desvio-Padrão (%) | REMQ (%) | Erro Absoluto (%) |
| I | 7,07 | 199,66 | 81,2 | 15,1 | 18,8 | -1,01 | 9,80 | 9,86 | 12,33 |
| II | 4,33 | 106,83 | 83,0 | 9,2 | 17,0 | -0,80 | 10,52 | 10,55 | 11,34 |
| V | 2,33 | 58,74 | 66,6 | 2,6 | 33,4 | -3,55 | 11,03 | 11,58 | 24,93 |
| III | 2,21 | 52,37 | 77,3 | 9,2 | 22,7 | -2,70 | 9,90 | 10,26 | 17,10 |
| IV | 1,34 | 20,89 | 72,8 | 6,6 | 27,2 | -1,92 | 12,97 | 13,11 | 20,36 |
| VI | 1,32 | 28,01 | 60,1 | 2,2 | 39,9 | -5,22 | 6,87 | 8,63 | 30,41 |
| VII | 0,76 | 16,97 | 54,2 | 0,8 | 45,8 | -5,21 | 8,10 | 9,63 | 36,28 |
| VIII | 0,44 | 7,90 | 45,3 | 2,3 | 54,7 | -6,36 | 7,55 | 9,87 | 45,44 |

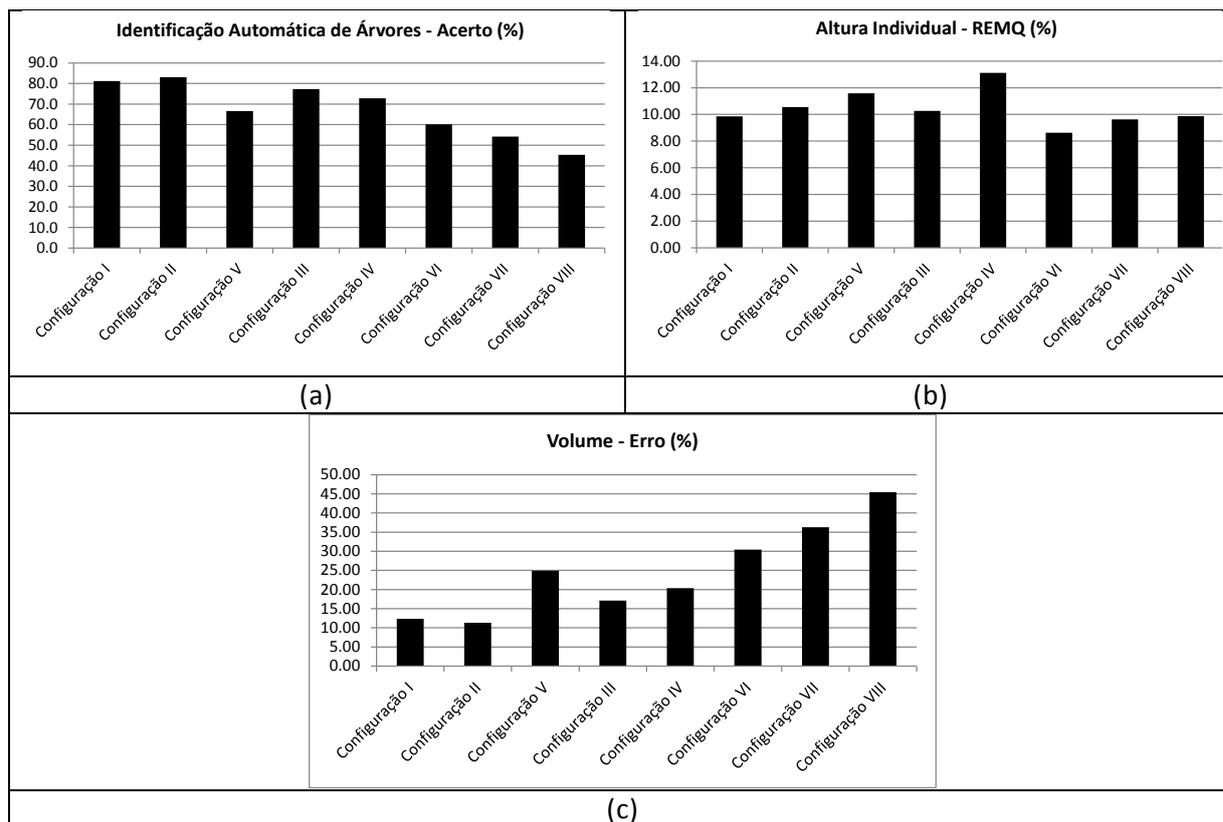


FIGURA 4.39 – RESULTADOS DA ABORDAGEM EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA O TALHÃO C

A partir dos dados mostrados na Tabela 4.61 foi construído modelo relacionando o erro absoluto no volume e as variáveis densidade, altura de voo e ângulo de abertura. O modelo ajustado é mostrado na Equação 4.3. A análise estatística para o modelo ajustado (coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação R^2 , coeficiente de determinação ajustado R^2 (ajustado) e erro padrão da estimativa (S_{xy})) é apresentada na Tabela 4.61.

Erro Volume Absoluto (%)

$$= -12,098855 + 1,161556 * densidade + 0,016856 * altura_{voo} + 1,110218 * \hat{angulo}_{abertura} \quad (4.3)$$

TABELA 4.61. VALORES DE R, R^2 , R^2 (AJUSTADO) E S_{xy} PARA O MODELO AJUSTADO RELACIONANDO O ERRO ABSOLUTO NO VOLUME E AS VARIÁVEIS DENSIDADE DE PONTOS, ALTURA DE VOO E ÂNGULO DE ABERTURA.

| R | R^2 | R^2 (ajustado) | S_{xy} (%) |
|-------|-------|------------------|--------------|
| 0,984 | 0,969 | 0,945 | 2,81 |

A Figura 4.40 mostra o gráfico relacionando a erro absoluto no volume (%) (obtido através dos experimentos realizados) e o valor do erro absoluto no volume (padronizado) estimado pelo modelo. A Figura 4.41 mostra o gráfico relacionando o valor do erro absoluto no volume residual e o valor do erro absoluto no volume (padronizado) estimado pelo modelo.

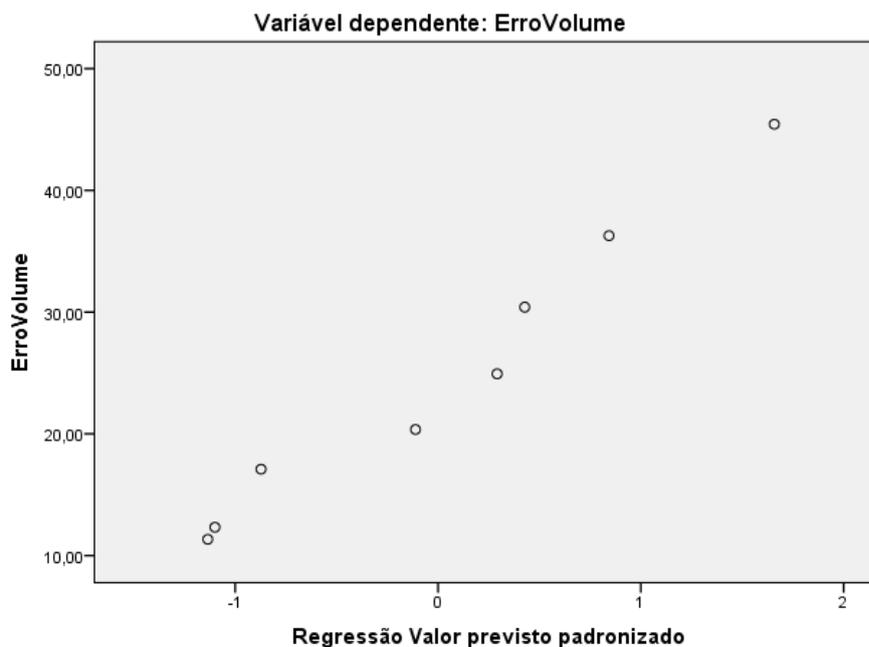


FIGURA 4.40 – EIXO VERTICAL: VARIÁVEL DEPENDENTE ERRO VOLUME ABSOLUTO (%) OBTIDO ATRAVÉS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS. EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO

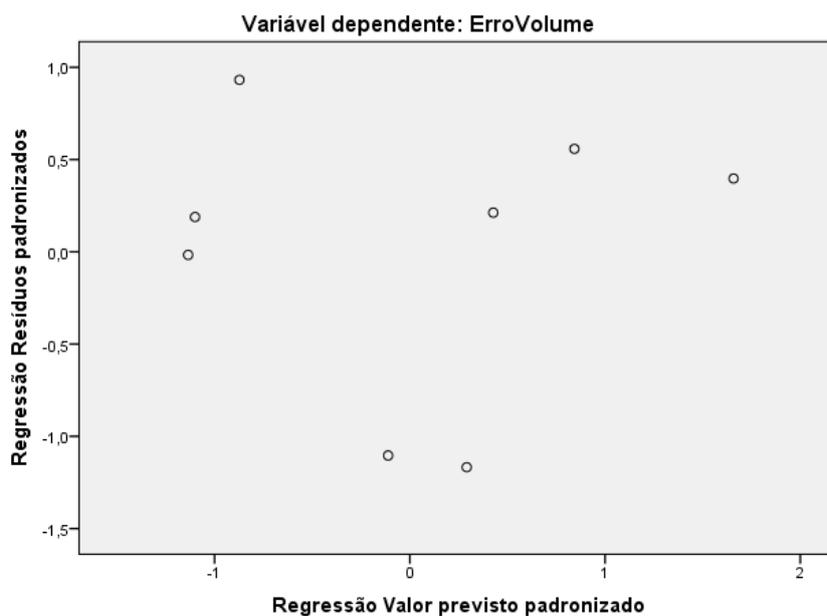


FIGURA 4.41 – EIXO VERTICAL: ERRO VOLUME RESIDUAL (PADRONIZADO). EIXO HORIZONTAL: ERRO VOLUME ABSOLUTO (PADRONIZADO) ESTIMADO PELO MODELO AJUSTADO

4.3.2.4 Discussão Resultados Abordagem Árvore Individual

As Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 mostram o desempenho em termos de identificação automática de árvores, altura individual e volume, respectivamente, utilizando as diferentes configurações para os três talhões investigados.

Em termos de detecção automática de árvores, o Talhão *B* (*Eucalyptus* Híbrido) foi o que apresentou melhor desempenho seguido pelo Talhão *A* (*Pinus taeda* – 2004) e o Talhão *C* (*Pinus taeda* – 1997). Um melhor desempenho para a espécie *Eucalyptus* Híbrido quando comparado com o *Pinus taeda* pode ser explicado pela maior uniformidade de altura das árvores e pelo formato da copa. O melhor desempenho do *Pinus taeda* mais jovem é devido principalmente ao maior espaço entre a copa das árvores (as copas ainda estão distantes uma das outras), o que facilita a identificação através do algoritmo utilizado.

Em se tratando da altura individual, novamente o *Eucalyptus* apresenta desempenho superior ao *Pinus* pelo fato de a altura do topo para as extremidades da copa ter variação menos acentuada. No caso da comparação entre as diferentes idades de *Pinus*, o mais jovem teve, na maioria dos casos, desempenho inferior uma vez que a probabilidade do seu topo ser mapeado é reduzida.

No quesito volume (impacto combinado do número de árvores e a altura) resultados melhores foram obtidos para o *Eucalyptus* uma vez que o mesmo apresentou desempenho superior em termos de detecção automática e altura individual. No caso das diferentes idades de *Pinus*, o mais jovem teve desempenho superior (exceto para a configuração VIII) uma vez que a identificação automática apresentou resultados superiores, a qual exerce maior impacto do que a altura individual no volume.

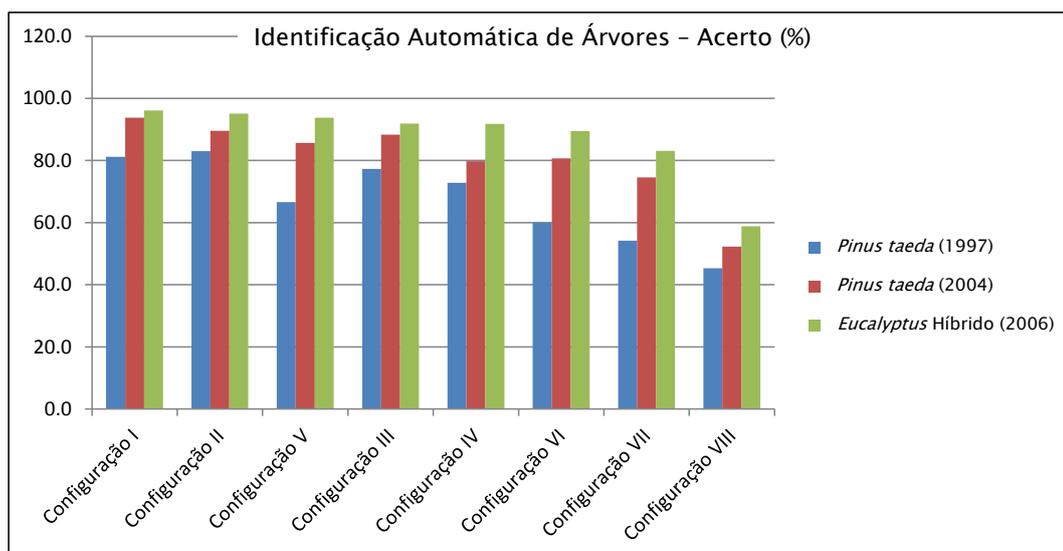


FIGURA 4.42 - ACERTO (%) IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE ÁRVORES PARA OS TALHÕES A, B E C

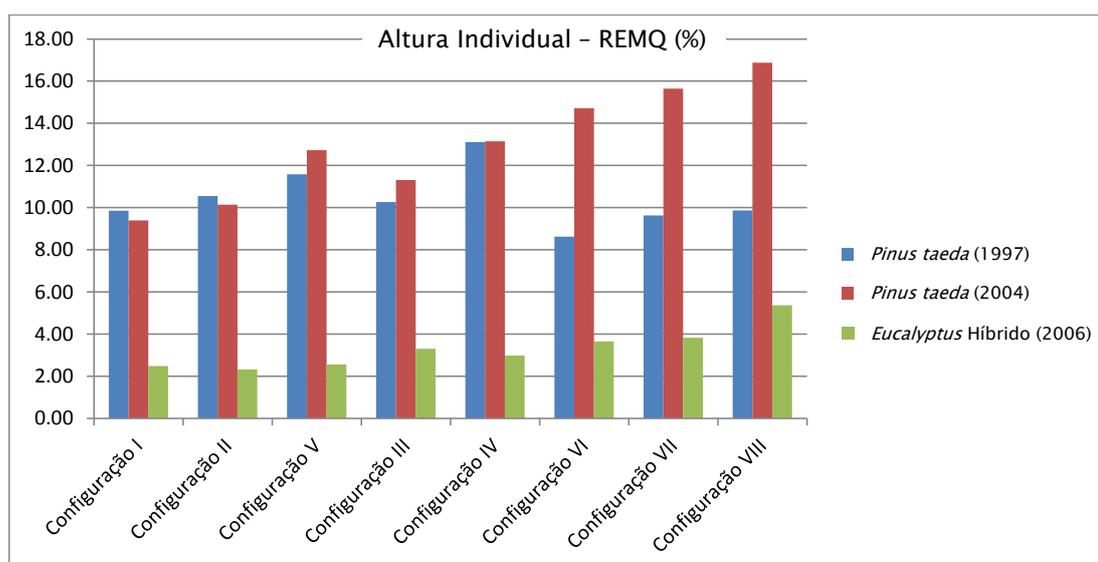


FIGURA 4.43 – REMQ (%) ALTURA INDIVIDUAL PARA OS TALHÕES A, B E C

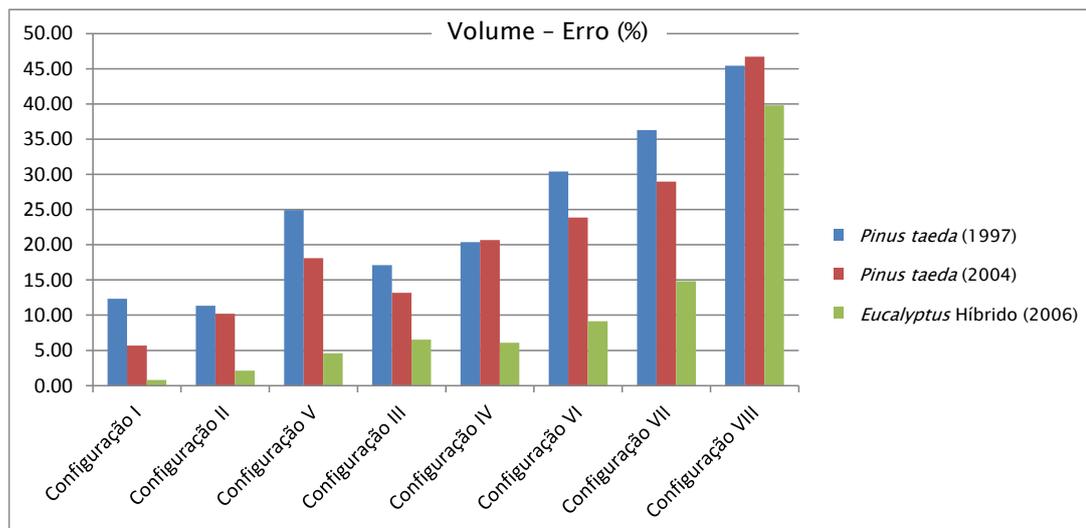


FIGURA 4.44 – ERRO (%) VOLUME PARA OS TALHÕES A, B E C

4.3.2.5 Análise do Impacto da Direção das Linhas de Voo

Para avaliar a influência da direção das linhas de voo na Abordagem em Nível de Árvore Individual, parte do Talhão B (*Eucalyptus* Híbrido) foi sobrevoado utilizando três direções de voo diferentes denominadas aqui de longitudinal (Figura 3.5a), transversal (Figura 3.5b) e inclinada (Figura 3.5c) utilizando a configuração I. No total foram 5 parcelas amostrais (parcelas 30, 31, 32, 34 e 35) que foram sobrevoadas utilizando as três direções de voo usando a configuração I.

A Tabela 4.62 mostra os resultados obtidos utilizando as diferentes direções de voo. Baseado nos experimentos realizados pode-se concluir que a direção de voo não exerce influência na precisão das variáveis florestais extraídas para uma dada configuração de voo. É importante lembrar que a direção de voo é sempre escolhida buscando otimização do tempo de voo. Portanto, a não dependência de uma direção de voo específica implicará na redução do tempo de voo.

TABELA 4.62 – RESUMO RESULTADOS ABORDAGEM DE ÁRVORE INDIVIDUAL UTILIZANDO DIFERENTES DIREÇÕES DE VOO

| Direção de Voo | Identificação das Árvores | | | Altura Individual | | Volume | |
|---------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|
| | Acerto (%) | Erro de Comissão (%) | Erro de Omissão (%) | Erro Médio (%) | Desvio-Padrão (%) | REMQ (%) | Erro Absoluto (%) |
| Longitudinal | 98,0 | 0,0 | 2,0 | -0,07 | 1,97 | 1,94 | 1,24 |
| Transversal | 98,0 | 7,5 | 2,0 | -0,16 | 2,00 | 2,00 | 1,34 |
| Inclinada | 97,2 | 0,4 | 2,8 | 0,20 | 1,96 | 1,97 | 1,47 |

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

A tecnologia LIDAR encontra-se em fase de maturidade, com um grande número de aplicações em diversos setores, a partir de dados advindos unicamente do sensor, ou em conjunto com outras tecnologias de sensoriamento remoto.

O setor florestal brasileiro, principalmente o de florestas plantadas está entre os mais desenvolvidos em nível mundial. Esse desempenho não se dá apenas pelas condições edafoclimáticas favoráveis no território brasileiro, mas também, em grande parte, do desenvolvimento tecnológico e da busca por novas tecnologias e inovações que melhorem o nível de produtividade e de competitividade internacional.

Entretanto, apesar dessas constatações, no Brasil, a tecnologia LIDAR ainda não está presente nas atividades cotidianas, resumindo-se a investigações pontuais, e comumente não sendo adotadas em larga escala devido ao custo associado.

Esse trabalho de pesquisa tem como objetivo principal analisar o impacto da utilização de diferentes configurações de voo para a aquisição de dados LIDAR na qualidade das variáveis extraídas de florestas plantadas, provendo desta forma, insumos para uma adequada análise custo-benefício, possibilitando uma análise crítica por parte dos tomadores de decisão. Entre os custos mais impactantes está o número de horas de voo, que está diretamente ligado à configuração de aquisição de dados adotada. No Brasil, todas as experiências pontuais sempre utilizaram uma única configuração, definida em 2003, objetivando uma geração de modelo densa, já que os principais objetivos eram de análise da viabilidade do uso da tecnologia na extração de informações para uso florestal, não se atendo quanto a questão da aplicabilidade em larga escala.

Alguns parâmetros configurados para o voo de aquisição de dados LIDAR estão diretamente ligados ao custo e à qualidade dos modelos gerados. Os principais e que são analisados nessa pesquisa são a altura de voo, o ângulo de varredura, e a direção de voo. Esses parâmetros definem, além do número de horas necessárias para recobrir determinada área, a densidade de pontos (ppm^2), a

precisão/acurácia do modelo digital do terreno gerado, e a precisão/acurácia das variáveis florestais extraídas.

De maneira a fornecer insumos para uma análise global, que possa levar em conta o objetivo do levantamento, foi realizada uma pesquisa ampla e exaustiva, a partir de dados adquiridos em 8 diferentes configurações, em 3 talhões com as duas espécies mais plantadas no Brasil, *Eucalyptus* e *Pinus*, com diferentes idades (Talhão A – *Pinus taeda* - 2004, Talhão B - *Eucalyptus* Híbrido - 2006 e Talhão C – *Pinus taeda* - 1997), considerando a realidade das empresas florestais brasileiras.

A qualidade dos modelos digitais de terreno é função da acurácia dos pontos mapeados, do tipo de interpolação, nesse caso TIN, do algoritmo de classificação, e do número/distribuição espacial dos pontos considerados como terreno. Nota-se que os resultados encontrados foram considerados satisfatórios, variando de 9 a 22 cm, erros esses guardando relação com a densidade de pontos de cada configuração. O Talhão C apresentou melhor resultado, com erros variando entre 9 e 15 cm. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato desta plantação de *Pinus* ter idade de 12 anos e, portanto já ter começado a sofrer desbastes, o que permite que um maior número de pontos chegue ao terreno. Para todos os talhões, os erros crescem no sentido da menor densidade de pontos.

O vento presente na fase de aquisição de dados com LIDAR é um fator de erro que deve ser considerado, já que os pontos mapeados no topo das árvores, em ocasiões como essa, terão alturas subestimadas, além de dificultar a identificação de árvores em nível individual. Deve-se evitar sempre que possível esse tipo de condição meteorológica.

Com o objetivo de analisar o impacto das diferentes configurações na qualidade das variáveis extraídas de florestas plantadas, foram utilizadas as duas abordagens mais utilizadas em trabalhos internacionais e recentes: Abordagem em Nível de Parcela Amostral e Abordagem em Nível de Árvore Individual.

Na Abordagem em Nível de Parcela Amostral, o objetivo é de modelar as variáveis dependentes (altura média, diâmetro médio, volume e suas transformadas) através de equações que utilizassem como variáveis independentes (p. ex. altura média, 10º percentil, 30º percentil) e suas transformadas. Utilizou-se a regressão stepwise, aplicando a metodologia para as 8 configurações nos Talhões A, B e C.

Essa abordagem tem seu uso mais difundido em projetos estratégicos em níveis regionais, onde não se necessita de dados de árvores individuais.

Observou-se para o Talhão A que as diferentes configurações resultaram em modelos com expressiva variação na qualidade de ajuste para as variáveis independentes investigadas. Para o Talhão B, além de apresentar grande variação na qualidade de ajuste para as diferentes configurações testadas, este talhão foi o que apresentou desempenho inferior. Os modelos ajustados apresentaram grande número de variáveis independentes, resultando em coeficientes de determinação ajustados notavelmente menores que os coeficientes de determinação. De forma geral, o Talhão C apresentou os melhores resultados, não sendo verificadas diferenças expressivas entre a qualidade de ajuste dos modelos construídos utilizando as diversas configurações.

Na Abordagem em Nível de Árvore Individual a qual objetiva a individualização das árvores, e a partir dessa individualização, estimar a altura da árvore individual, tem maior aplicação nas atividades comerciais das empresas florestais. Considerando as 8 configurações analisadas, verifica-se que para o Talhão A, as configurações I, II e III apresentaram resultados para identificação de árvores superior a 88%, para estimativa da altura individual REMQ (%) inferior a 6,8% e erro absoluto de volume inferior a 13%. A configuração I tem um tempo de voo de referência de aproximadamente 200 min e a configuração III tempo de voo de aproximadamente 52 min, quase 4 vezes inferior. Se os erros aceitáveis estiverem dentro dessa faixa, recomenda-se o uso da configuração III.

Para o Talhão B, as configurações I a V apresentaram resultados para identificação de árvores superior a 90%, para estimativa da altura individual REMQ (%) inferior a 3% e erro absoluto de volume inferior a 6,5%. Chama a atenção que a configuração I tem um tempo de voo de referência de aproximadamente 200 min, a configuração IV de aproximadamente 21 min, e a V de aproximadamente 59 min. Nota-se que a relação entre essas diferentes configurações, considerando o fator tempo voo varia de 3,5 a 10 vezes.

No Talhão C, os resultados para todas as configurações foram inferiores, devido a dificuldade de individualização das copas. A análise das configurações indica que para a configuração I, que apresentou os melhores resultados, apresentou 81,2 % de acerto na identificação de árvores, REMQ (%) de 9,86 % para

a estimativa da altura individual, e 12,33% de erro absoluto na estimativa do volume. Como comparação, a configuração III apresentou 77,3 % de acerto na identificação de árvores, REMQ (%) de 10,26 % para a estimativa da altura individual, e 17,10% de erro absoluto na estimativa do volume. Percebe-se que, com exceção ao volume, as outras variáveis analisadas apresentaram resultados próximos, e reiterando que a razão entre os tempos de voo é de 4 vezes, o que deve ser levado em conta na tomada de decisão.

Uma análise geral das configurações analisados com a Abordagem em Nível de Árvore Individual para a espécie *Pinus* mostra que é possível obter resultados satisfatórios para a configuração III (altura de voo de 700 m e ângulo de varredura 110), que consome 4 vezes menos tempo de voo. Para a espécie *Eucalyptus*, a configuração V (altura de voo de 2.000 m e ângulo de varredura 3,5⁰) apresentou resultados comparáveis com as configurações mais conservadoras e que geram maior densidade de pontos.

Analisando sobre o ponto de vista de densidade de pontos, para o talhão com *Eucalyptus*, verificou-se que densidades de 6,7 ppm² na configuração I e de 1,45 ppm² na configuração IV, produzem resultados muito próximos. Da mesma forma para o Talhão A, as densidades da 6,7 ppm² na configuração I, e de 2,1 ppm² para a configuração III produziram resultados semelhantes. Para o Talhão C, os melhores resultados foram obtidos com densidades entre 7,1 ppm² na configuração I e 2,2 ppm² na configuração III.

Em termos de comparação do desempenho na Abordagem em Nível de Árvore Individual das diferentes espécies investigadas pode-se observar um melhor desempenho para a espécie *Eucalyptus*, o qual pode ser explicado pela maior uniformidade de altura das árvores e pelo formato da copa, quando comparado com a espécie *Pinus*. Tais características conduziram a um melhor desempenho em termos de detecção automática de árvore e altura individual.

Uma análise comparativa para as diferentes espécies *Pinus* indica melhor desempenho para o *Pinus* mais jovem. Este melhor desempenho é devido principalmente ao maior espaço entre a copa das árvores (as copas ainda estão distantes uma das outras), o que facilita a identificação através do algoritmo utilizado.

Para a análise do impacto da direção de voo utilizada na obtenção de variáveis florestais utilizando a Abordagem em Nível de Parcela Amostral, em função da disponibilidade dos dados, foi utilizado o Talhão C, voado com a configuração I (altura 700 m, ângulo de varredura 3,5°). Foram calculadas as diferenças considerando a direção longitudinal como referência. Para a variável altura média e suas transformadas não houve variação significativa quando da utilização de diferentes direções de voo (valores de REMQ (%) inferiores a 5%). Para as demais variáveis observaram-se maiores variações.

Na análise do impacto da direção de voo utilizada na obtenção de variáveis florestais utilizando a Abordagem em Nível de Árvore Individual, em função da disponibilidade dos dados, foi utilizado o Talhão B, voado com a configuração I (altura 700 m, ângulo de varredura 3,5°). Os resultados encontrados indicam que para o tipo de análise presente nessa metodologia, e para as variáveis analisadas (altura, número de árvores, e volume), não há diferença notáveis entre as diferentes direções.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve por objetivo fornecer insumos para a escolha da configuração de aquisição de dados LIDAR para a extração de variáveis florestais como identificação de indivíduos, altura, diâmetro e volume, que conduza a minimização dos custos. Entretanto, ainda existem questões a serem investigadas.

Para realização de estudos futuros dentro desta linha de pesquisa as seguintes recomendações são sugeridas:

- Para melhor compreensão da influência da direção de voo, recomenda-se a aquisição de dados LIDAR em uma área mais extensa, com maior número de parcelas e principalmente, com diferentes configurações de aquisição, uma vez que nessa pesquisa apenas dados de uma configuração estavam disponíveis (configuração I).
- Com o advento comercial dos novos sensores LIDAR, já disponíveis no Brasil, que possuem capacidade simultânea de registrar vários retornos discretos, e capacidade de digitalização de toda onda de retorno, recomenda-se a

investigação dos resultados com ambas tecnologias, dado que o número de informações oriundas desse tipo de sistema permite obter um número maior de dados quanto a estrutura vertical da floresta, permitindo a caracterização de eventuais sub bosques e de árvores dominadas.

- Recomenda-se, sempre que possível, que os trabalhos de campo ocorram concomitantemente com os voos de aquisição de dados, procurando dessa forma reproduzir o mesmo ambiente nos dois levantamentos. Nessa pesquisa ficou claro a influência do vento no mapeamento dos topos de árvores.
- A presente pesquisa fez uso de dados coletados em diversos voos de aquisição. Não se utilizou em nenhum momento a decimação da nuvem de pontos, isto é, criar diferentes densidades artificialmente, a partir de dados de um único voo. A não adequação de tal procedimento ficou evidente nos experimentos realizados nos quais verificou-se que com mesma densidade de pontos, obtidas a partir de alturas de voo e ângulos de varredura diferentes, os resultados apresentaram diferenças. Portanto, não somente a densidade de pontos exerce influência nas variáveis florestais extraídas mas também as condições operacionais nas quais a mesma foi obtida.
- Com o avanço da tecnologia LIDAR, a capacidade de emissão de pulsos foi multiplicada por 10 em menos de 10 anos. Com essa capacidade de pontos mapeados recomenda-se mais pesquisas com ênfase na Abordagem em Nível de Árvore Individual, principalmente nas aplicações de inventários florestais de florestas plantadas para fins comerciais.
- Recomenda-se reproduzir a pesquisa aqui realizada com as mesmas espécies, mas com diferentes idades, procurando identificar se a idade é uma variável que deve ser levada em consideração nas avaliações.
- Na Abordagem em Nível de Parcela Amostral, quando de posse de um número maior de parcelas de campo, recomenda-se a validação dos modelos, isto é, a avaliação da habilidade de previsão dos modelos gerados, utilizando parcelas independentes, as quais não foram utilizadas na construção dos modelos.
- O presente estudo se deu em áreas com pouca variação de declividade. Para uma avaliação mais abrangente dos modelos digitais de terreno, e conseqüente influência na derivação de informações de interesse florestal

quando da utilização de diferentes configurações de voo, recomenda-se que próximos trabalhos utilizem áreas com topografia acidentada.

- Para a Abordagem em Nível de Árvore Individual, uma das contribuições deste trabalho de pesquisa foi a construção de modelo relacionando o erro absoluto no volume com a densidade de pontos, altura voo e ângulo de varredura utilizados, para as diferentes espécies de florestas plantadas investigadas. Recomenda-se em trabalhos futuros a validação de tais modelos a partir da derivação do erro no volume para uma configuração não utilizada para construção dos modelos.

Por fim, espera-se que os resultados desta pesquisa auxiliem na escolha de configurações de aquisição de dados LIDAR mais apropriadas no contexto da realidade operacional das empresas florestais.

REFERÊNCIAS

ABRAF. **Anuário estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas 2013 ano base 2012**. Brasília, 2013. 148 p.

_____. **Anuário estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas 2012 ano base 2011**. Brasília, 2012. 150 p.

ACKERMANN, F. Airborne laser scanning- present status and future expectations. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 64-67, 1999.

ALDRED, A. H.; BONNOR, G. M. **Applications of airborne lasers to forest surveys**. Canadá: Pentawawa National Forestry Institute, 1985. 62 p. Information Report PI-X-051.

ALHARDTHY, A. **Airborne laser scanning: system evaluation and building extraction**. 233 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Purdue University. West Lafayette, 2003.

AXELSSON, P. **DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 33, n. B 4/1, part 4, p. 111-118, 2000.

BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 83-94, 1999.

_____. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 199-214. 1999.

BLAIR, J. B. *et al.* Optimization of an airborne laser altimeter for remote sensing of vegetation and tree canopies. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1994. **Proceedings...**Pasadena, 1994. P. 939-941.

BRIESE, C.; PFEIFER, N.; DORNINGER, P. Applications of the robust interpolation for DTM determination. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n.3/A, p. 55-61, 2002.

CARSON, W. W. *et al.* LiDAR applications in forestry: an overview. In: ASPRES ANNUAL CONFERENCE, 2004. **Proceedings...** Denver, 2004.

CASTRO, F. da C. e. **Segmentação de imagens geradas por laser scanning aerotransportado para delimitação de árvores individuais em áreas de reflorestamento de eucaliptos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

GOODWIN, N.; COOPES, N.; CULVENOR, D. S. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. **Remote Sensing of Environmental**, v. 103, n. 2, p. 140-152, 2006.

HABIB, A. *et al.* Alternative methodologies for the internal quality control of parallel LiDAR strips. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 48, n. 1, p. 221-236, 2010.

_____. A strip adjustment procedure to mitigate the impact of inaccurate mounting parameters in parallel LiDAR strips. **The Photogrammetric Record**, v. 24, n. 126, p. 171-195, 2009.

_____. Error budget of LiDAR systems and quality control of the derived data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 75, n. 9, p. 1093-1108, 2009.

HABIB, A.; KERSTING A. P.; BANG, K. **Detecting Systematic Biases and GNSS/INS Drifts in LiDAR Data**. ION 2009 International Technical Meeting, Anaheim, CA, p. 26-28, 2009.

HOLLAUS, M. *et al.* Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 5, p. 323-338, 2006.

HUISING, E. J.; GOMES PEREIRA, L. M. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, n. 5, p. 245-261, 1998.

HYYPPÄ, J. *et al.* Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8/W2, p. 82-89, 2004.

IAPAR. **Média histórica para a estação de Telêmaco Borba (1976-2011)**.

Disponível em:

<http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medidas_Historicas/Telemaco_Borba.htm>. Acesso em: 14/9/2012.

IPARDES. **Indicadores de sustentabilidade ambiental por bacias hidrográficas do Estado do Paraná**. Curitiba, 2010.

JACOBSEN, K.; LOHMANN, P. Segmented filtering of laser scanner DSMs. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 34, n. 3/W13, 2003.

KAARTINEN, H.; HYYPPA, J. **Tree extraction**. Germany: European Spatial Data Research, 2008. Official Publication, n. 53.

KAARTINEN, H. *et al.* An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. **Remote Sensing**, v. 4, n. 4, p. 950-974, 2012.

KAREL, W.; PFEIFER, N.; BRIESE, C. DTM quality assessment. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 2, p. 7-12, 2006.

KERSTING, A. P. *et al.* Strip adjustment using conjugate planar and linear features in overlapping strips. In: ASPRS ANNUAL CONFERENCE, 2008. **Proceedings...** Portland, 2008.

_____. Quantitative evaluation and quality control of commercially adopted traditional and modern LiDAR system calibration techniques. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2013.

_____. Quality control of traditional and modern LiDAR system calibration techniques. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, 2013, Taiwan. **Proceeding...** Taiwan, 2013.

_____. **Quality assurance of multi-sensor systems**. 265 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – University of Calgary, Alberta, 2011.

KILIAN, J.; HAALA, N.; ENGLICH, M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing**, Viena, Austria, v.31, part B3, p.383-388, 1996.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. Advanced DTM generation from LiDAR data. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 3/W4, p. 23-30, 2001.

_____. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 193-203, 1998.

KWAK, D. *et al.* Detection of individual tree height using LiDAR data. **Journal of Forest Research**, v. 12, n. 6, p. 425-434, 2007.

LACTEC. **Mapeamento digital a laser**: projeto piloto de mapeamento de áreas florestais – área de Aracruz, ES. Curitiba, 2003. Relatório Técnico.

_____. **Mapeamento digital a laser**: projeto piloto de mapeamento de áreas florestais – área de Votorantim, SP. Curitiba, 2003. Relatório Técnico.

LEFSKY, M. A. *et al.* An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 1, p. 78-87, 2001.

LINDENBERGER, J. **Laser-profilmenssugen zur topographischen gelandeaufnahme**. 131 f. Dissertation (Doktor-Ing.) – Fakultät für Bauingenieur-und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, Munchen, 1993.

LOVELL, J. L. *et al.* Simulation study for finding optimal lidar acquisition parameteres for forest height retrieval. **Forest Ecology and Management**, v. 214, n. 1, p. 398-412, 2005.

MACEDO, R. de C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de *Eucalyptus sp.* através de laserscanner aerotransportado**. 145 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

MAGNUSSEN, S. BOUDEWYN, P. Derivation of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 28, n.7, p. 1016-1031, 1998.

MALTAMO, M. *et al.* Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. **Forestry**, v. 79, n. 2, p. 217-229, 2006.

_____. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distributions. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n.3, p. 319-330, 2004.

MCCOMBS, J. W. *et al.* Influence of fusing lidar and multispectral imagery on remotely sensed estimates of stand density and mean tree height in a managed loblolly pine plantation. **Forest Science**, v. 49, n. 3, p. 457-466, 2003.

MEANS, J. E. *et al.* Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, n. 11, p. 1367-1372, 2000.

_____. Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, n. 3, p. 298-308, 1999.

MULLER, M. **Acompanhamento da amostragem para inventário florestal e levantamento topográfico das áreas de interesse**. Curitiba: LACTEC, 2010. Relatório Técnico.

NAESSET, E. Determination of means tree height of forest stands using airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 49-56, 1997.

_____. Effects of different flying altitudes on biophysical stand properties estimated from canopy height and density measured with a small-footprint airborne scanning laser. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 2, p. 243-255, 2004.

_____. Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 1, p. 148-159, 2009.

_____. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 88-89, 2002.

NAESSET, E.; BJERKNES, K-O. Estimating tree Heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanning data. **Remote Sensing of Environment**, v. 78, n. 3, 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, n. 1, p. 105-115, 2002.

- NELSON, R. Modeling forest canopy heights: the effects of canopy shape. **Remote Sensing of Environment**, v. 60, n. 3, p. 327-334, 1997.
- NELSON, R.; KRABILL, W.; MACLEAN, G. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, v. 15, n.3, p. 201-212, 1984.
- NELSON, R.; KRABILL, W.; TONELLI, J. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 2, p. 247-267, 1988.
- NILSON, M. Estimating of tree heights and stand volume using na airborne lidar system. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, n. 1, p. 1-7, 1996.
- OLIVEIRA, L. T. de. *et al.* Application of LiDAR to forest inventory for tree count in stands of Eucalyptus sp. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 175-184, 2012.
- PELLICO NETO, S., BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba, 1997. 316 p.
- PFEIFER, N. *et al.* Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. In: WORKSHOP ON AIRBONE LASERSCANNING AND INTERFEROMETRIC SAR FOR DETAILED DIGITAL TERRAIN MODELS, Stockholm, Sweden, 2001. **Proceedings...** Stockholm, Sweden, 2001.
- PIRES, J. M. **Uso do LiDAR (Light detection and ranging) para estimação da altura de árvores em povoamentos de eucalipto**. 65 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Ciência Florestal, Viçosa, 2005.
- POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, n. 1, p. 71-95, 2002.
- POPESCU, S. C. **Estimating plot-level forest biophysical parameters using smallfootprint airborne lidar measurements**. 115 f. Thesis (Doctor of Philosophy) Blacksburgh, Virginia, 2002.
- RIEGER, W. *et al.* Roads and buildings from laser scanner data within a forest enterprise. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32, n. 3, p. W 14, 1999.
- ROGGERO, M. Airborne laser scanning-clustering in raw data. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 3, p. 227-232, 2001.
- SCHENK, T. **Modeling and analyzing systematic erros in airborne laser scanners**. Ohio, 2001. Technical Report in Photogrammetry, n. 19.
- SITHOLE, G. **Segmentation and classification of airborne laser scanner data**. Thesis (PhD) – Delft University of Technology, 2005.
- SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G. Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 3, p. W19, 2005.

SOHN, G.; DOWMAN, I. J. Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n.3/A, p. 336-344, 2002.

SOLLODUKHIN, V. *et al.* Possibilities of laser aerial photography for forest profiling. **Lesnoe Khozyaisto (Forest Management)**, v. 10, p. 53-58, 1977.

TOTH, C. Airborne lidar technology: the state of the art and future trends. In: LATIN AMERICAN REMOTE SENSING WEEK, 2010, Chile. **Proceedings...** Chile, 2010.

VOSSelman, G. Slope based filtering of laser altimetry data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B3/2, part. 3. P. 935-942, 2000.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning: an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 68-82, 1999.

YU, X. *et al.* Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8, p.W2, 2004.

ZANDONA, D. F. **Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Engenharia Florestal, Curitiba, 2006.

ZHANG, K. *et al.* A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 4, p. 872-882, 2003.

ZONETE, M. F. **Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus sp.* no sul da Bahia**. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.