

ANA PAULA HUMMES

**ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA DE ÁRVORES INDIVIDUAIS
DE *Pinus taeda* L. UTILIZANDO AEROFOTOS DE CÂMERA
DE PEQUENO FORMATO DIGITAL CALIBRADA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Felipe Kirchner

CURITIBA

2002



Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias – Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico – CAMPUS III
80210-170 - CURITIBA - Paraná
Tel (41) 360 4212 - Fax (41) 360 4211 - <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao>
e-mail: pinheiro@floresta.ufpr.br

PARECER
Defesa nº 465

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir a mestranda *ANA PAULA HUMMES* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado “ESTIVATIVA VOLUMÉTRICA DE ÁRVORES INDIVIDUAIS DE *Pinus taeda* L. UTILIZANDO AEROFOTOS DE CÂMERA DE PEQUENO FORMATO DIGITAL CALIBRADA”, é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** da acadêmica, habilitando-a ao título de *Mestre em Ciências Florestais*, na área de concentração em *Manejo Florestal*.

Dr. Flávio Felipe Kirchner

Professor e pesquisador do Departamento de Ciências Florestais da UFPR
Orientador e presidente da banca examinadora

Dr. Sebastião do Amaral Machado

Professor e pesquisador do Departamento de Ciências Florestais da UFPR
Primeiro examinador

Dr. Edson Aparecido Mitishita

Professor e pesquisador do Departamento de Geomática da UFPR
Segundo examinador

Curitiba, 13 de março de 2002.

Nivaldo Eduardo Rizzi

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Franklin Galvão

Vice-coordenador

À minha mãe, Eunice

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realização do Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela pronta disponibilidade de recursos materiais e humanos.

À FEPAGRO – Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do RS, pela concessão da área de estudo, e em especial aos funcionários da Estação Experimental de Silvicultura de Santa Maria, pelo auxílio na obtenção dos dados.

Às Empresas INFOIMAGE – Soluções em Geoprocessamento, ENGEFOTO – Engenharia e Aerolevantamentos S.A., SOFTMAPPING Engenharia Ltda. e DATUM Serviços Topográficos Ltda., pela disponibilização de equipamentos e recursos humanos fundamentais à realização deste trabalho.

À COMFLORESTA – Cia. Catarinense de Empreend. Florestais, pelo apoio.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao Professor Dr. Flávio Felipe Kirchner, pela orientação e incentivo.

Aos Professores Dr. Rudiney Soares Pereira e Dr. Doádi Antônio Brena, pela co-orientação.

Aos Professores Dr. José Bitencourt de Andrade, Enrique Soares Koehler, e Adroaldo Robaina, pela valiosa ajuda e orientação em diferentes fases do trabalho.

Ao meu noivo Ricardo A. do Amaral, pela ajuda, carinho, e compreensão.

Aos amigos Fábio, Akiko, Nazaré e Regina, pela grande amizade, ajuda e incentivo.

Às colegas e amigas Marilice, Juliana e Janize pela colaboração na coleta de dados em campo.

A todos meus amigos, pelos bons e maus momentos compartilhados.

Às demais pessoas que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 FOTOGRAMETRIA DIGITAL	3
2.1.1 Fotografias, Imagens e Câmeras Digitais	4
2.2 INVENTÁRIO FLORESTAL COM FOTOGRAFIAS AÉREAS	6
2.2.1 Dimensões das Copas das Árvores	7
2.2.2 Altura das Árvores	7
2.2.3 Estimativa do Volume das Árvores	9
2.3 ANÁLISE DE REGRESSÃO	11
3 MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESPÉCIE	13
3.2 ÁREA DE ESTUDO	13
3.2.1 Clima	13
3.2.2 Solos	14
3.2.3 Vegetação	14
3.3 METODOLOGIA	15
3.3.1 Determinação da Resolução das Imagens e da Escala de Vôo	15
3.3.2 Planejamento do Vôo	15
3.3.3 Pré Sinalização dos Pontos de Apoio Terrestres	16
3.3.4 Execução do Vôo e Obtenção das Imagens	16
3.3.5 Levantamento das Coordenadas dos Pontos de Apoio Terrestres	17
3.3.6 Medição das Variáveis Dendrométricas em Campo	19
3.3.6.1 Determinação do DAP	19
3.3.6.2 Medição da altura total (H_c)	20
3.3.7 Estimativa do Volume em Campo (V_c)	21
3.3.8 Restituição Fotogramétrica	21
3.3.9 Identificação e Medição das Variáveis Dendrométricas nas Imagens Aéreas... 23	
3.3.9.1 Medição da área das copas (AC)	23
3.3.9.2 Medição da altura total (H)	23
3.3.10 Estudo de Correlação Linear Simples entre Variáveis	24
3.3.10.1 Volume (V_c) x variáveis pré selecionadas	24
3.3.10.2 CAP x Área da copa (AC)	24

3.3.11 Modelos de Regressão Pré Seleccionados da Literatura	24
3.3.12 Elaboração de Equação de Regressão pelo Método <i>Stepwise</i>	26
3.3.13 Critérios de Seleção da Melhor Equação de Regressão	26
3.3.13.1 Coeficiente de determinação (R^2)	27
3.3.13.2 Erro padrão da estimativa (S_{xy}) e erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{xy}\%$)	27
3.3.13.3 Teste F	28
3.3.13.4 Teste de comparação entre os coeficientes de correlação	29
3.3.13.5 Significância dos coeficientes da equação	29
3.3.13.6 Análise dos resíduos	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE APOIO TERRESTRES	30
4.2 ESTEREO ORIENTAÇÃO DAS IMAGENS	32
4.3 IDENTIFICAÇÃO E MEDIÇÕES DAS ÁRVORES DAS IMAGENS AÉREAS....	33
4.4 ESTUDO DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES	34
4.4.1 Volume x Variáveis Pré Seleccionadas	34
4.4.2 CAP x Área da Copa.....	35
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO	37
4.5.1 Equações de Regressão Ajustadas pelos Modelos de Regressão Pré Seleccionados	37
4.5.2 Equação de Regressão Ajustada pelo Método <i>Stepwise</i>	39
4.6 SELEÇÃO DA MELHOR EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	40
4.7 ANÁLISE DOS RESÍDUOS	43
5 CONCLUSÃO	45
6 RECOMENDAÇÕES	47
REFERÊNCIAS	49
ANEXOS	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – GRUPO 1: MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ALTURA TOTAL	25
TABELA 2 – GRUPO 2: MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ÁREA DE COPA	25
TABELA 3 – GRUPO 3: MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ALTURA TOTAL E ÁREA DA COPA	26
TABELA 4 – COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO TERRESTRES	30
TABELA 5 – INFORMAÇÕES SOBRE O PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS	31
TABELA 6 – COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO TERRESTRES NO MODELO ORIENTADO E SEUS RESÍDUOS (m)	32
TABELA 7 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS MEDIDAS EM CAMPO E UTILIZADAS NAS ANÁLISES	33
TABELA 8 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS MEDIDAS NAS IMAGENS AÉREAS E UTILIZADAS NAS ANÁLISES	34
TABELA 9 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE VOLUME E VARIÁVEIS INDEPENDENTES	35
TABELA 10 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO SIMPLES ENTRE CAP E ÁREA DA COPA	35
TABELA 11 – GRUPO 1: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ALTURA TOTAL	38
TABELA 12 – GRUPO 2: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ÁREA DA COPA	39
TABELA 13 – GRUPO 3: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ALTURA TOTAL E ÁREA DA COPA	39
TABELA 14 – EQUAÇÃO DE REGRESSÃO AJUSTADA PELO MÉTODO <i>STEPWISE</i>	40

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
FIGURA 2 – LEVANTAMENTO DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO TERRESTRES	19
FIGURA 3 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO HIPSÔMETRO FORESTOR VERTEX	20
FIGURA 4 – PROCESSO DE RESTITUIÇÃO NA ESTAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DIGITAL <i>DVP</i>	22
FIGURA 5 – RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE CAP E AC	36
FIGURA 6 – RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE CAP E AC^2	36
FIGURA 7 – RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE CAP E \sqrt{AC}	37
FIGURA 8 – VOLUME OBSERVADO VS. VOLUME ESTIMADO DA EQUAÇÃO 5 $V = b_o + b_1H \log AC + b_2H$	42
FIGURA 9 – VOLUME OBSERVADO VS. VOLUME ESTIMADO DA EQUAÇÃO 11 $V = b_o + b_1H\sqrt{AC} + b_2(H \cdot AC)$	42
FIGURA 10 – VOLUME ESTIMADO VS. RESÍDUOS DA EQUAÇÃO 5 $V = b_o + b_1H \log AC + b_2H$	44
FIGURA 11 – VOLUME ESTIMADO VS. RESÍDUOS DA EQUAÇÃO 11 $V = b_o + b_1H\sqrt{AC} + b_2(H \cdot AC)$	44

LISTA DE ABREVIATURAS

- CCD – *Charge Coupled Device*
CID – *Charge Injection Device*
DVP – *Digital Video Plotter*
GPS – *Global Positioning System*
DGPS – *Differential Global Positioning System*
RDOP – *Relative Dilution of Precision*
WGS 84 – *World Geodetic System 1984*
UTM – *Universal Transverse of Mercator*
SAD 69 – *South America Datum 1969*
CAP – Circunferência a Altura do Peito
DAP – Diâmetro a Altura do Peito
AC – Área da Copa
DC – Diâmetro da Copa
 H_c – Altura total da árvore determinada em campo
H – Altura total da árvore determinada nas imagens aéreas
 V_c – Volume da árvore determinado em campo
V – Volume da árvore determinada determinado por equação volumétrica

RESUMO

Para a estimativa de volume de árvores individuais de *Pinus taeda* L. em povoamentos homogêneos algumas equações de regressão pré selecionadas da literatura foram testadas, e outra equação foi gerada pelo método *Stepwise*. Todas as equações foram ajustadas para o conjunto de dados estudado visando estimar o volume das árvores a partir de medições de variáveis dendrométricas efetuadas em aerofotos digitais obtidas com câmera digital de pequeno formato. O povoamento estudado localiza-se na Estação Experimental de Silvicultura, no município de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul. Inicialmente executou-se um vôo pré-sinalizado na escala 1:10.000 com uma câmera digital calibrada MAMYIA 645 PRO, de distância focal 80mm e resolução 15 μ , e obteve-se imagens com resolução no terreno de 0,15m. Posteriormente, levantou-se pontos de apoio terrestre com GPS geodésico, que com os parâmetros de calibração da câmera, permitiram a orientação do modelo estereoscópico e a restituição das feições desejadas. Em campo foram coletadas as variáveis dendrométricas altura total e CAP das árvores e, nas imagens aéreas, a área das copas e a altura total. O volume das árvores em campo foi estimado por equação volumétrica desenvolvida para a região. As equações de regressão estudadas para estimar o volume a partir de imagens aéreas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados em função do volume estimado em campo e das variáveis dendrométricas determinadas nas imagens. Verificou-se que é possível a identificação de árvores individuais de *Pinus taeda* L. em povoamentos homogêneos e a medição de variáveis dendrométricas utilizando imagens aéreas digitais de alta resolução. Dentre as equações ajustadas, as que melhor explicaram a variação do conjunto de dados estudado foram:

$$V = -0,2171 + 0,0111(H \log AC) + 0,0317(H) \quad e$$

$$V = -0,2237 + 0,0179(H \sqrt{AC}) - 0,0013(H \cdot AC)$$

apresentando valores R^2_{aj} de 0,7087 e 0,7089, $S_{xy}\%$ de 16,9303 e 16,9321, respectivamente, e significância de todos os coeficientes.

Palavras – chave: inventário florestal, *Pinus taeda* L., câmeras digitais.

ABSTRACT

This research aimed to test pre selected regression models and establish another one by *Stepwisē* method to estimate the volume of *Pinus taeda* L. individual trees in homogeneous stands from dendrometric variables measured in aerial pictures taken from small format digital camera. The studied stand is located in the Estação Experimental de Silvicultura, Santa Maria county, Rio Grande do Sul state. Initially a pre signalized flight was executed in 1:10.000 scale using a calibrated digital camera MAMYIA 645 PRO, of 80mm focal distance, 15 μ terrain resolution, and it was obtained 0,15m resolution images. Later on it was collected ground control points with geodetic GPS that, with the camera calibration parameters, made possible to do the stereoscopic model orientation and to restitute the desired features. The dendrometric variables total height and breast height circumference were collected in field and, crown area and total height in the images. The tree volumes in field was estimated by volumetric equation developed for the region. The regression equations for volume estimation were adjusted by least squares method considering the volume estimated in field and the variables measured in the aerial images. It was concluded that it is possible to identify *Pinus taeda* L. individual trees in homogeneous stands and measure dendrometric variables in high resolution digital aerial images. Among the adjusted equations to estimate volume, that ones which better explained the studied data set variation were:

$$V = -0,2171 + 0,0111(H \log AC) + 0,0317(H) \quad \text{and}$$

$$V = -0,2237 + 0,0179(H \sqrt{AC}) - 0,0013(H \cdot AC)$$

which presented R^2_{aj} 0,7087 and 0,7089, $S_{xy}\%$ 16,9303 and 16,9321, respectively, and significance of all coefficients.

Key words: forest inventory, volume estimation, *Pinus taeda* L., digital cameras.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação periódica da produtividade dos povoamentos florestais é uma prática comum nas empresas cujo objetivo é a produção madeireira. Esta prática consiste em uma determinação acurada de variáveis dendrométricas, como altura das árvores e diâmetro a altura do peito, que possam ser usadas na estimativa do volume das florestas. Durante as fases iniciais dos povoamentos, tais variáveis podem ser obtidas mais rápida e precisamente. Porém, em fases mais avançadas, muito tempo é despendido para se obter dados acurados, aumentando, conseqüentemente, o custo de obtenção dos mesmos. Para reduzir os custos na estimativa volumétrica de povoamentos florestais, as empresas são, freqüentemente, forçadas a reduzir o número de amostras ou aplicar técnicas menos onerosas e, muitas vezes, menos acuradas para obtenção desses dados.

Atualmente, com o avanço da fotogrametria digital, é possível obter-se dados acurados sobre os recursos naturais em um menor tempo. O grande potencial oferecido pelas novas tecnologias, como câmeras digitais de alta resolução, sistema de posicionamento global por satélites (GPS), *hardwares* de elevada capacidade de processamento e armazenamento e *softwares* de alta interatividade, não apenas viabilizaram as técnicas de fotogrametria digital voltadas ao mapeamento terrestre, mas também otimizaram as avaliações qualitativa e quantitativa dos recursos naturais.

Em alguns países de clima predominantemente temperado, como Estados Unidos e Canadá, inúmeras pesquisas florestais têm sido desenvolvidas com sucesso auxiliando-se de fotografias aéreas em grande escala para a determinação do volume de povoamentos e de árvores individuais. Estudos realizados por KOVATS (1997) para testar a eficácia do uso de fotografias aéreas de grande escala na determinação da altura das árvores em povoamentos adultos de *Pinus elliotti*, mostram a viabilidade técnica e econômica do método. Da mesma forma, TITUS e MORGAN (1985) provaram que, tendo-se um controle adequado dos erros sistemáticos, a determinação da altura das árvores em fotografias aéreas de grande escala pode ser tão acurada, e até mesmo superior, às medidas de campo.

No Brasil, o desenvolvimento da fotogrametria para aplicação florestal ainda é muito incipiente e se limita a alguns centros de pesquisas e grandes universidades. Talvez o limitado conhecimento dos profissionais sobre o potencial da tecnologia e o conservacionismo do setor florestal, o qual vem adotando práticas tradicionais de inventários florestais desenvolvidos a muitos anos e bem dominadas para avaliação da produtividade dos povoamentos, tem freado o desenvolvimento de pesquisas sobre a aplicação da fotogrametria na avaliação dos recursos florestais.

A realização de um estudo sobre a estimativa volumétrica de árvores individuais de *Pinus taeda* L a partir de variáveis dendrométricas medidas em imagens aéreas digitais métricas como complemento, e até mesmo substituição aos trabalhos de campo, certamente contribuirá para o acompanhamento do desenvolvimento dos povoamentos florestais, especialmente em relação ao tempo despendido e à acurácia na obtenção dos dados.

Desta forma, o presente trabalho teve por objetivo geral estimar o volume de árvores individuais de *Pinus taeda* L. em povoamentos adultos homogêneos utilizando técnicas de fotogrametria digital. Dentre os objetivos específicos do trabalho estão: 1) verificar até que exatidão é possível identificar e efetuar medições de árvores individuais de *Pinus taeda* L. em povoamentos homogêneos utilizando imagens aéreas digitais de alta resolução obtidas a partir de câmera digital calibrada; 2) por meio do método dos mínimos quadrados, ajustar e selecionar equações volumétricas para estimar o volume das árvores em função de variáveis dendrométricas medidas nas imagens aéreas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FOTOGRAMETRIA DIGITAL

A fotogrametria digital tem sua raiz nos anos cinquenta quando *Hobrough* iniciou experimentos com correlação. Por quase vinte anos, os métodos de correlação permaneceram como a única atividade notável. Contudo, os novos recursos disponíveis estimularam grandemente as atividades de pesquisa. Novos produtos como estações fotogramétricas digitais estão aparecendo no mercado, sinalizando que a transição da fotogrametria analítica para digital também está assumindo uma posição importante na atividade de fotogrametria (SCHENK e TOTH, 1991).

A diferença fundamental entre sistemas fotogramétricos analógicos e digitais é o uso de imagens digitais por estes, ao invés de fotografias analógicas. As imagens digitais podem ser obtidas a partir da digitalização de fotografias analógicas ou por câmeras digitais. Outra diferença é a função central que o modelamento matemático assume nos sistemas digitais, os quais integram numerosas funções fotogramétricas em um ambiente computacional (LILLESAND e KIEFER, 1994).

De acordo com TEIXEIRA e CHRISTOFOLETTI (1997), nas estações fotogramétricas de restituição digital combinam-se a capacidade de visualização de imagens fotogramétricas no monitor do computador com a execução de medições pelos processos fotogramétricos. Nestas estações, o aparato ótico-mecânico é substituído pelo software.

Conforme ANDRADE (1998), a economia e a tecnologia dos dias de hoje requerem da fotogrametria o máximo rigor nas mensurações. No entanto, mesmo sendo muito mais rigorosos, os métodos não podem perder sua aplicabilidade em virtude de custos muito altos ou do longo tempo de observação. Nesse sentido, a fotogrametria digital apresenta-se como uma alternativa, em virtude do seu potencial de aceitação matemática. Com isso, a fotogrametria digital oferece métodos visando

automação, flexibilidade, velocidade e elevado grau de precisão, aliado a um menor custo.

Para que a fotogrametria funcione em um ambiente digital, os dados de entrada devem ser digitais. Existem duas maneiras de obter imagens digitais: a primeira é converter as fotografias analógicas por meio de digitalização em *scanner*; a segunda é coletar as imagens diretamente na forma digital usando sensores digitais (câmera digital). O desenvolvimento do sensor digital, que pretende complementar, e no futuro, substituir o processo convencional, apresenta ainda uma série de problemas, e o mais sério deles é o volume de dados a serem coletados e armazenados durante o voo, além da resolução que é necessário atingir (TOMMASELLI, 2000).

2.1.1 Fotografias, Imagens e Câmeras Digitais

Entende-se por fotografia o registro de uma cena, através de um sensor remoto denominado câmera fotográfica, por métodos analógicos, ou seja, as cenas são registradas em emulsões fotosensíveis. Uma imagem é obtida por métodos eletrônicos, onde o sensor remoto detecta a energia eletromagnética refletida ou emitida pela cena de interesse e converte estes sinais em valores digitais (JENSEN, 1986).

Segundo o mesmo autor, uma imagem é formada por *pixels*, derivado do inglês *picture element*. O *pixel* em uma imagem tem sua localização definida por um sistema de coordenadas do tipo “coluna e linha”, representados por “x” e “y”, respectivamente. Cada *pixel* possui também um atributo numérico “z” que indica o valor de brilho, o qual representa a intensidade da energia eletromagnética registrada pelo sensor para a área da superfície terrestre correspondente.

As câmeras digitais são dispositivos nos quais a superfície sensora é constituída de elementos fotodetectores em substituição à película fotográfica utilizada nas câmeras convencionais. Com base no tipo de leitura/saída de carga, os sistemas sensores podem ser classificados em CCD (*charge coupled device*), CID (*charge injection device*) e fotodiodo. As câmeras digitais mais utilizadas são as do tipo CCD (GRUEN, 1987).

Uma câmera digital não métrica, quando calibrada, pode ser empregada para a fotogrametria. Porém, mesmo com a variedade de câmeras digitais existentes no mercado (diferentes resoluções, tamanho de arquivos e preço), nem todas podem ser utilizadas para esta finalidade (WARNER e SLAATTELID, 1997).

Ainda, segundo WARNER e SLAATTELID (1997) e PITT et. al. (1997), existem três atrativos quando se trabalha com câmeras digitais. Primeiro, os resultados são imediatos, pois não é necessário esperar pela revelação do filme. Segundo, os custos associados à digitalização das imagens não existem. Terceiro, a câmera pode ser usada com segurança para fins fotogramétricos quando provida de rotinas de calibração.

Com relação aos pontos negativos, WARNER e BLANKENBERG (1995) e WARNER e SLAATTELID (1997), enumeram três que devem ser levados em consideração quando se trabalha com câmeras digitais de pequeno formato para fins fotogramétricos. Primeiro, a grande limitação das câmeras de pequeno formato é a limitada área de cobertura do terreno. Segundo, o medidor de luz interno, desenhado para filme e não para CCD, requer experiência para corrigir anomalias de exposição. Terceiro, a resolução espacial não é tão boa quanto ao filme.

Segundo GRAHAM (1995) e MILLS et. al. (1996), em adição aos problemas normais associados com as câmeras não métricas, existe uma limitação destas quando empregadas em levantamentos aerofotogramétricos. O problema é que as câmeras digitais necessitam de um certo tempo para a tomada de cada foto (3 a 5 s). Embora as câmeras usem um CCD e possam ser expostas instantaneamente como num filme, elas necessitam de um determinado tempo para carregar os dados da imagem antes que a próxima exposição seja tomada. Este processo é feito em duas etapas. Num primeiro passo os dados são registrados na memória, e, posteriormente, enviados para o disco.

No entanto, os autores MILLS et. al. (1996) e PITT et. al. (1997) concluem que, com o avanço da tecnologia, as câmeras digitais conseguirão capturar as imagens num menor espaço de tempo, a capacidade de armazenamento de dados na memória será maior e as baterias possibilitarão mais exposições.

2.2 INVENTÁRIO FLORESTAL COM FOTOGRAFIAS AÉREAS

As fotografias aéreas têm um potencial não muito aproveitado em relação a redução de tempo e custos na coleta de dados em inventários florestais de grande extensão. Fotografias de média escala (1:10.000 à 1:25.000) têm sido utilizadas para estratificar extensas florestas heterogêneas em áreas menores, mais uniformes, possibilitando assim uma amostragem mais eficiente em campo. Para obter dados quantitativos, o uso de fotografias é menos comum. Fotografias aéreas de grande escala (1:2.000 à 1:3.000) podem ser usadas para se obter estimativas rápidas de volume em povoamentos florestais (BIGGS e SPENCER, 1990).

Embora a medição direta de árvores ou povoamentos nas fotografias aéreas seja limitada à altura, diâmetro de copas e contagem do número de árvores por unidade de área, estas variáveis podem resultar, por meios indiretos, numa boa estimativa do volume e do DAP. A exatidão obtida na estimativa desses parâmetros depende da precisão com que as medições possam ser efetuadas nas fotografias e da correlação que estas tenham com o diâmetro da copa (SPURR, 1952).

Muitas pesquisas têm sido realizadas procurando encontrar maior número de variáveis que possam ser medidas ou interpretadas nas fotografias aéreas. Tais trabalhos têm por objetivo estimar variáveis como DAP e volume que não podem ser medidos diretamente nas fotografias aéreas. A relação entre essas e outras variáveis passíveis de medição em fotografias aéreas pode diferir de espécie para espécie, sendo importante o exato conhecimento dessas relações para a eventual combinação de dados de várias essências nas análises (ALDRED e SAYN-WITTENGENSTEIN, 1972).

SPENCER (1987) em seu estudo com fotografias aéreas de grande escala aplicadas ao inventário florestal, concluiu que persistia a dúvida quanto ao potencial dos métodos fotogramétricos, e também que esses métodos eram vistos como não suficientemente práticos e muito difíceis para implementar.

No entanto, conforme GAGNON et. al. (1993), é importante lembrar que a fotogrametria era baseada nos sistemas convencionais ótico-mecânico, que, por razões de custo, complexidade, e pouca flexibilidade, era sempre de acesso limitado. Mas, com o advento da fotogrametria digital esses conceitos mudaram. O desenvolvimento

de sistemas fotogramétricos digitais possibilitou além da obtenção de produtos mais flexíveis com custos reduzidos, o estabelecimento de operações com menor complexidade respeitando os rigores técnicos exigidos na fotogrametria.

2.2.1 Dimensões das Copas das Árvores

Em fotografias analógicas, a área da copa das árvores costuma ser medida com uma rede de pontos sob um estereoscópico, e a escolha desta rede é determinada em função da escala das fotografias e de características próprias da área, como tamanho e forma das árvores (ALDRED e SAYN-WITTGENSTEIN, 1972). Porém, em imagens digitais, esta variável pode ser determinada diretamente através da digitalização do contorno da copa da árvore desejada, e o valor da área da copa será em função da resolução da imagem.

LOETSCH e HALLER (1973) citam três instrumentos usados para a medição do diâmetro da copa das árvores em fotografias analógicas: cunha micrômetro; escala para diâmetro de copa; e barra de paralaxe. Em imagens digitais esta medida é obtida da mesma maneira que a área da copa, pela digitalização de raios perpendiculares sobre a copa da árvore desejada.

Conforme SPURR (1960), as dimensões das copas obtidas em fotografias aéreas não são comparáveis com medições similares tomadas em campo. Este pesquisador considera que apenas parte de uma árvore visível será medida, não o sendo os galhos ocultos pelo recobrimento por outras árvores.

2.2.2 Altura das Árvores

A altura de uma árvore é definida como a distância vertical que vai da base ao topo da mesma.

A altura das árvores é uma das medidas mais importantes e onerosas para ser coletada em levantamentos florestais. Para evitar o alto custo dessas medições, os pesquisadores são forçados a reduzir o número de árvores a serem medidas, ou reverter para uma técnica que seja menos onerosa, e normalmente, menos precisa (KOVATS, 1997).

Segundo LOETSCH e HALLER (1973) existem quatro métodos para a determinação da altura das árvores em fotografias aéreas analógicas: 1) medição do comprimento das sombras; 2) estimativa ocular da altura do objeto em um estereopar ou em fotografia única; 3) medição da diferença de paralaxe em pares estereoscópicos; e 4) deslocamento aparente do objeto em um par de fotografias. SPURR e BROWN (1946) afirmam que a precisão da medição da altura é diretamente proporcional à escala da fotografia. Porém, SPURR (1952), ALDRED e SAYN-WITTEGENSTEIN (1972) e LOETSCH e HALLER (1973) afirmam que o método mais preciso e aceitável para a determinação da altura em fotografias aéreas é o da medição da diferença de paralaxe.

De acordo com TITUS e MORGAN (1985) e KOVATS (1997), alguns estudos têm mostrado que as alturas das árvores obtidas através de fotografias aéreas de grande escala podem ser tão ou mais exatas que as medidas obtidas em campo. Com o avanço da tecnologia em câmeras e instrumentos e a evolução dos computadores, a fotogrametria digital está se tornando mais acessível às diversas áreas técnicas e com custos inferiores aos apresentados pela fotogrametria analógica.

LYONS (1966) apud KOVATS (1997), usando aerofotos na escala de 1:5000, mediu a altura de 394 árvores de várias espécies, com alturas variando entre 16 e 46 m. Ele concluiu que as medidas nas fotos foram melhores do que as medidas tomadas em campo.

ALDRED e LOWE (1978) e NIELSEN et. al. (1979), em trabalhos de inventário florestal com fotografias de grande escala, encontraram erros para medidas das alturas das árvores inferiores a 1m para árvores com altura média de 21m.

Na medição de altura em povoamento natural no Canadá através de fotografias aéreas na escala 1:12.000, ALDRED e KIPPEN (1976) encontraram um erro padrão da estimativa na ordem de 6% da média na medição dessa variável.

De acordo com COLLINS (1957) apud OLIVEIRA (1980), em estudo realizado sobre a precisão na medição de altura das árvores em fotografias aéreas na escala 1:40.000, foram medidas 40 árvores. A árvore média apresentou 27,4m, e o erro padrão da estimativa para as árvores dominantes foi de 1,5m.

Citado pelo mesmo autor, MacLEAN (1963) ao estudar as tendências nas estimativas de altura por fotografias aéreas em espécie *Pseudotsuga menziensis*, comenta que houve diferenças estatisticamente significativas entre as medições de altura realizadas por diferentes intérpretes, apresentando subestimativa das árvores pequenas e superestimativa das grandes no povoamento.

2.2.3 Estimativa do Volume das Árvores

Segundo HUSCH (1963), o volume é a magnitude tri-dimensional de um objeto, sendo expresso em unidades cúbicas as quais podem ser derivadas de algumas das unidades de comprimento.

MAKAY (1964) afirma que, para indivíduos de uma mesma espécie, vegetando em iguais condições de clima e solo, sujeito aos mesmos regimes, pertencentes às mesmas classes de diâmetro e altura, pode-se admitir que estas árvores possuem a mesma forma e, conseqüentemente, o mesmo volume. Desta forma, o volume de uma árvore pode ser diretamente relacionado com sua altura e diâmetro, através de métodos gráficos, monogramas, e analiticamente por meio de técnica de regressão.

Segundo SAYN-WITTGENSTEIN e ALDRED (1967), o volume de árvores individuais é obtido mais precisamente quando estimado diretamente a partir de variáveis determinadas nas fotografias aéreas, e não por meio da estimativa de outras variáveis como DAP. Estes pesquisadores afirmam que as variáveis mais importantes na estimativa do volume individual de uma árvore são aquelas que podem ser medidas diretamente nas fotografias, as quais são: altura total da árvore (H), diâmetro da copa (DC), e área da copa (AC).

As afirmações acima foram confirmadas por OLIVEIRA (1980), onde a variável combinada $H \times DC^2$ foi a mais altamente correlacionada com o volume de *Araucaria angustifolia* ($r = 0.90$), seguido de $H \times DC$ ($r = 0.88$).

Conforme LOETSCH e HALLER (1973), a densidade das copas é essencial para a estimativa de volumes através de fotografias aéreas, sendo uma característica

relacionada a povoamentos e não podendo ser obtida através de árvores individuais, ao contrário do diâmetro de copas e alturas.

ALDRED e LOWE (1978), trabalhando com fotografias aéreas na escala 1:1000, desenvolveram equações para estimar o volume individual de *Picea glauca* (Moench) Voss, através da altura e da área de copa, definindo como melhor equação a que utiliza apenas a variável altura medida na foto, com erro padrão da estimativa de 22%. Assim sendo tem-se:

$$V = b_0H + b_1H^2$$

Porém, os mesmos autores reduziram o erro para 14,5% após a inclusão da variável área de copa na seguinte equação de regressão:

$$V = b_0 + b_1H + b_2\sqrt{AC} + b_3H\sqrt{AC}$$

Esses autores afirmam que a redução do erro padrão da estimativa com a inclusão da variável área de copa na equação pode não ser justificável em função do tempo adicional requerido na medição desta variável.

Em estudo realizado em floresta mista, de coníferas (*Picea galuca* e *Picea strobus*) e folhosas, SAYN-WITTGENSTEIN e ALDRED (1972) relacionaram dezessete combinações de variáveis mensuráveis em fotografias aéreas para gerar equações de regressão pelo método dos mínimos quadrados. Com a aplicação do método *stepwise* de seleção de variáveis, os autores apresentaram a equação mais promissora na obtenção do volume:

$$V = b_0 + b_1H + b_2(H \times \sqrt{AC}) + b_3AC$$

Em inventário florestal realizado com fotografias aéreas em grande escala na Nova Escócia, Canadá, BONNOR (1977) construiu pelo método dos mínimos quadrados a seguinte equação de volume para *Pinus resinosa* A.

$$V = b_0 + b_1H\sqrt{AC} + b_2\sqrt{AC}$$

NIELSEN et al. (1979) usando técnicas de amostragem com fotografias aéreas em grande escala para estimar o volume de *Populos balsamifera* L., determinaram o seguinte modelo de regressão pelo método dos mínimos quadrados:

$$V = b_0(H)^{b_1} \times (AC)^{b_2}$$

HALL et. al. (1989), ALDRED e LOWE (1978) e SAYN-WITTGENSTEIN e ALDRED (1967), determinaram que, para muitas espécies, a altura total das árvores é a variável mais fortemente correlacionada com o volume e o diâmetro. Depois da altura estão as medidas do tamanho da copa (normalmente área da copa) e medidas de competição com as árvores vizinhas. No entanto, HALL et. al. (1989) mostraram que o custo extra para medição das áreas das copas poderiam não ser justificadas, porque o benefício com a sua inclusão nas funções para estimar volume ou diâmetros seria muito pequeno.

2.3 ANÁLISE DE REGRESSÃO

LOETSCH e HALLER (1973) definem a regressão como a obtenção de uma expressão quantitativa da dependência da variável Y de uma ou mais variáveis independentes X.

Os métodos de regressão são de grande utilidade na derivação das relações empíricas entre vários fenômenos observados, como por exemplo, o volume das árvores em função do diâmetro, a altura e o fator de forma. A análise de regressão permite o ajustamento de modelos matemáticos que envolvem diversas variáveis (FREESE, 1964).

Segundo o mesmo autor, as aplicações mais comuns dos métodos de regressão têm um ou ambos objetivos a seguir:

- 1) encontrar uma função matemática que possa ser utilizada para descrever a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes;

- 2) testar hipóteses sobre a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes.

De acordo com DRESS (1959) apud UBIALLI (1981), a técnica de análise de regressão apresenta a vantagem de ser inteiramente objetiva, uma vez que as inter-relações entre as variáveis dependentes e independentes são determinadas. O procedimento aplicado aos dados básicos envolve um ajustamento de uma curva de modo que a soma dos quadrados dos desvios entre os volumes reais e os estimados pela linha de regressão seja minimizada.

Segundo FREESE (1964), a variável dependente deve ser equacionada em função de variáveis que lhe sejam correlacionadas, já que sua estimativa somente pode ser determinada com precisão se esta correlação existir.

Esse autor também afirmou que o mérito de uma equação volumétrica aumenta consideravelmente se ela possuir poucas variáveis que sejam fáceis de mensurar com exatidão, sejam altamente correlacionadas com o volume, tenham baixa correlação entre si e o volume estimado por árvores individuais se aproxime do volume calculado pela técnica padrão de cubagem de árvores abatidas.

Segundo ALDRED e SAYN-WITTGENSTEIN (1972), o principal critério para a escolha final da regressão deve ser a redução no erro padrão da estimativa. Como um padrão de comparação para regressões com conjunto de dados diferentes, o erro padrão da estimativa traz vantagens sobre o coeficiente de determinação que é fortemente afetado pelo conjunto de dados.

Os autores DRAPER e SMITH (1966) comentam que uma função ajustada deve ser interpretada considerando os seguintes aspectos:

- ser uma aproximação matemática e não uma lei;
- válida somente na amplitude dos dados amostrados, devendo ser evitadas extrapolações;
- baseada em amostragem e sujeita à variabilidade da amostra;
- sujeita ao erro de amostragem, isto é, qualquer estimativa deverá ser feita considerando intervalos de confiança.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESPÉCIE

O *Pinus taeda* Lineu é uma conífera do grupo Australes, pertencente a subseção Pinaster e subgênero Diplyoxylon de ocorrência natural nos Estados Unidos da América (MIROV, 1967).

Esta espécie ocorre naturalmente entre as latitudes 28 e 39°N, longitudes 75 e 97°W e altitudes compreendidas entre 0 e 2.400 metros. A precipitação média anual varia entre 900 e 2.200 milímetros. O regime de chuvas pode ser periódico, com períodos secos de até 2 meses, ou de distribuição uniforme ao longo do ano. A temperatura média anual situa-se entre 13 e 19°C, a média das máximas do mês mais quente entre 20 e 25°C e a média das mínimas do mês mais frio entre 4 e 18°C. Os solos são de textura leve a pesada, com pH geralmente ácido e drenagem média. Ocasionalmente, a espécie pode ocorrer em solos sujeitos a alagamentos por um período curto de dias (EMBRAPA, 1986).

3.2 ÁREA DE ESTUDO

A Estação Experimental de Silvicultura ocupa uma área de 542 ha no distrito Boca do Monte pertencente ao município de Santa Maria, no Estado do Rio Grande do Sul, na Região da Depressão Central, entre as latitudes 29°30' e 29°45' Sul, longitudes 54° e 54°15' Oeste, e entre 90 e 150m de altitude (FIGURA 1).

3.2.1 Clima

O clima da região, segundo a classificação climática de *Köppen*, é da variedade C_{fbg}' , ou seja, subtropical (ou quase temperado), úmido, sem estiagem. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22° C e a do mês mais frio oscila entre 13° e 18° C (IPRNR, 1988).

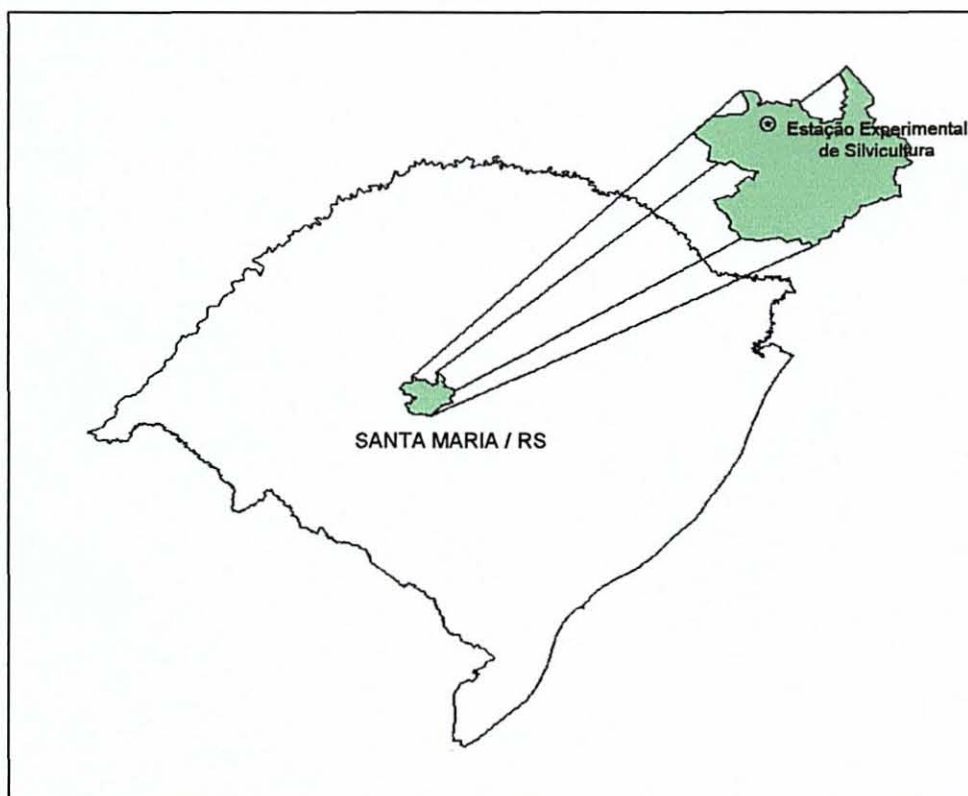
3.2.2 Solos

Os solos da região são pertencentes à formação Santa Maria e Rosário do Sul, mais evoluídos como Podzólicos Vermelho-Escuro e Vermelho-Amarelo nas áreas mais elevadas e, nas superfícies erosionais, solos menos evoluídos como Podzólico Bruno-Acinzentado, Litólicos e Areias Quartzosas (IPRNR, 1988).

3.2.3 Vegetação

A vegetação predominante é de campo com espécies rizomatosas – estoloníferas de baixo porte. As matas nativas são representadas por formações de galeria ao longo dos cursos d'água com predomínio de espécies de baixo porte, principalmente Mirtáceas, Anacardiáceas e algumas Leguminosas. Porém, este tipo de vegetação apresenta-se muito modificada pela introdução de espécies florestais de alto porte tanto nativas quanto exóticas (IPRNR, 1988).

FIGURA 1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Determinação da Resolução das Imagens e da Escala do Vôo

A determinação da resolução das imagens foi em função do objetivo do trabalho, da resolução do CCD, e da estabilidade da aeronave. Com o objetivo de efetuar medições precisas de área da copa e da altura das árvores, adotou-se a resolução final do pixel das imagens de 15cm no terreno e, sendo a resolução do CCD de 15 μ , a escala média determinada para o vôo foi de 1:10.000.

3.3.2 Planejamento do Vôo

O plano de vôo gráfico para obtenção das aerofotos digitais na escala média de 1:10.000 foi traçado sobre um mapa da área na escala 1:5.000. Em função do desenvolvimento de diferentes pesquisas na mesma área de estudo utilizando os mesmos recursos, foram estabelecidas quatro faixas de vôo de 2.000m de comprimento no sentido leste-oeste de modo a abranger o povoamento que se desejava avaliar.

Os parâmetros do vôo como altura, intervalo de exposição entre a tomada das imagens e distância entre faixas de vôo foram determinados em função da estabilidade da aeronave, da escala média de vôo e das especificações do equipamento fotográfico. Para a escala média de vôo de 1:10.000 e distância focal nominal da câmera fotográfica de 80mm, a altura de vôo calculada foi de 800m. Sendo a área útil (*frame*) de registro das imagens pelo CCD de 31mm x 31mm, com resolução de 2048 x 2048 pixels, e a velocidade média da aeronave de 150km/h, o intervalo de exposição entre a tomada das imagens foi de 3 segundos para uma sobreposição longitudinal de 60%. A distância entre faixas de vôo para uma sobreposição lateral de 40% foi de 186m. A seqüência de fórmulas para os cálculos acima pode ser encontrada em LUGNANI et. al. (1977).

3.3.3 Pré Sinalização dos Pontos de Apoio Terrestres

Antes da execução do voo foram instalados quinze alvos em campo, sendo cinco no início, cinco no meio, e cinco no final das faixas de voo, localizados na região de sobreposição lateral das imagens. Esses alvos serviram de pontos de apoio terrestre para a posterior orientação do modelo estereoscópico.

A determinação do tamanho dos alvos foi em função da resolução espacial das imagens. Desta forma, optou-se pela instalação de alvos quadrados, de 1,80m x 1,80m, com um círculo central de 0,60m de diâmetro. O material utilizado na confecção desses alvos foi cal virgem no círculo central e pó de carvão ao redor do mesmo visando aumentar o contraste e facilitar a identificação nas imagens (ver FIGURA 2).

3.3.4 Execução do Voo e Obtenção das Imagens

O voo foi executado no dia 18 de julho de 2000, entre 10h e 11h, em um avião monomotor Cessna SKYLANE. Para auxiliar o piloto na orientação do avião em relação às faixas de voo pré-estabelecidas, foi utilizado um aparelho GPS de navegação GARMIN 12XL.

As imagens foram tomadas com a câmera fotográfica MAMYIA 645 PRO, com distância focal nominal de 80mm, calibrada por ANDRADE (2001). Nela foi acoplado um dispositivo CCD (*Charge Couple Device*), cujo sensor apresenta 2048 x 2048 pixels, ou seja, 31mm x 31mm e 15 μ de resolução, que atua como substituto do filme fotográfico registrando as imagens diretamente em meio digital. O CCD captura uma imagem em formato pseudo *tiff* de 8Mb a cada 0.7 segundos e armazena em memória de *buffer* (RAM) com capacidade de 64Mb. Enquanto o CCD transfere os dados para um cartão PCMCIA com capacidade de armazenamento de 520Mb, o registro das imagens é interrompido por 8 segundos até que mais memória de RAM seja liberada.

O disparo da câmera para a tomada das imagens foi manual utilizando-se um intervalômetro que acusava os 3 segundos entre as exposições consecutivas.

Após a execução do voo e tomada das imagens, as mesmas foram processadas em ambiente MACHINTOSH utilizando-se o *software* PHOTOSHOOT e convertidas para o formato *tiff*.

3.3.5 Levantamento das Coordenadas dos Pontos de Apoio Terrestres

A escolha do sistema e do método de observação para o levantamento das coordenadas planialtimétricas dos pontos de apoio terrestre foi em função do nível de precisão desejável. Para se obter a precisão centimétrica requerida na determinação das coordenadas geodésicas horizontais ϕ , λ e verticais h dos pontos de apoio terrestre, optou-se pela metodologia de posicionamento geodésico por satélites, sistema NAVSTAR – GPS, através do método Estático Relativo, com a utilização de receptores GPS geodésicos.

Visando determinar as coordenadas planialtimétricas dos 4 pontos de apoio terrestre necessário para a restituição das imagens aéreas, dois pré sinalizados (HV1000 e HV1003) e dois fotoidentificáveis (HV1001 e HV1002), utilizou-se dois receptores GPS SOKKIA GEODÉSICOS, MODELO GSS 1A, 8 canais, Portadora L1 e Código C/A, com precisão de 0,5cm + 1ppm, para o levantamento estático com base curta e pós processamento (FIGURA 2).

O levantamento obedeceu o princípio de irradiação, onde as coordenadas de todos os pontos de apoio são determinadas em função de um ponto central. O ponto escolhido para ser o centro do irradiação foi o HV 1005, localizado em campo aberto e sem a presença de obstáculos que pudessem interferir ou bloquear o sinal dos satélites. Sobre este ponto foi instalado um receptor que assumiu a função de *estação base*. Com o segundo receptor, denominado *receptor móvel*, percorreu-se os quatro pontos de apoio para a determinação de suas coordenadas geodésicas. Os dois receptores foram nivelados e ajustados segundo a altura da antena, temperatura externa, umidade relativa, pressão, intervalo de tempo de registro dos sinais dos satélites e ângulo da máscara de elevação, e alimentados com uma coordenada aproximada do local determinada com um receptor GPS DE NAVEGAÇÃO GARMIN 12 XL, com precisão de 10m. A altura da antena foi variável tanto para a base quanto para o móvel. Os dados de temperatura e umidade relativa para ambos os receptores também variaram conforme as condições climáticas, e a pressão atmosférica considerada foi 760mmHg. O intervalo de tempo de registro dos sinais foi de 5

segundos e o ângulo da máscara de elevação de 10° para os dois receptores. O tempo de rastreamento dos sinais com o receptor móvel em cada ponto de apoio foi de 360 épocas, ou seja, aproximadamente 30 minutos, e a estação base permaneceu ligada durante todo o período de levantamento desses pontos.

As coordenadas aproximadas da estação base HV1005 foram calculadas em função dos sinais rastreados pelo próprio aparelho receptor. Porém, para a determinação de suas coordenadas conhecidas, foi necessário o rastreamento deste ponto por aproximadamente 3 horas simultaneamente e em sincronia com um receptor instalado em um ponto com coordenadas conhecidas. O pós processamento diferencial (DGPS) dos dados foi realizado para a correção de possíveis erros causados pela falta de sincronismo entre os relógios dos satélites e receptores, erros de efemérides, atmosféricos e ionosféricos.

O ponto de coordenadas conhecidas rastreado localiza-se na UFSM, a aproximadamente 20km da área de estudo. O receptor utilizado foi um GPS TOPCON GEODÉSICO, MODELO GP- R1, 12 canais, Portadora L1 e Código C/A, com precisão de $0,5\text{mm} + 2\text{ppm}$. As coordenadas conhecidas dos demais pontos de apoio foram determinadas com o pós processamento diferencial dos dados do receptor móvel com os da estação base HV1005, tendo esta suas coordenadas já determinadas, baseado no sistema de referência de coordenadas WGS-84.

Em função da limitação dos aparelhos, especialmente o tempo de vida útil das baterias, de 3,5 horas, foram necessários 2 dias para o levantamento dos pontos de apoio e determinação das coordenadas conhecidas da estação base em campo.

FIGURA 2 – LEVANTAMENTO DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO TERRESTRES



3.3.6 Medição das Variáveis Dendrométricas em Campo

No mês de setembro de 2000, foram medidos a CAP (circunferência a altura do peito) e a altura total de 316 árvores em um povoamento homogêneo de *Pinus taeda* L., com 22 anos de idade, espaçamento inicial de 2,5m x 2,5m e regime de desbaste seletivo. Juntamente com as medições foi feito um croqui da localização das árvores em campo para posterior identificação das mesmas nas imagens aéreas (ver ANEXO I).

Segundo DILWORTH (1977), para se obter uma boa estimativa do volume, são necessárias medidas dendrométricas de 75 a 100 árvores.

3.3.6.1 Determinação do DAP

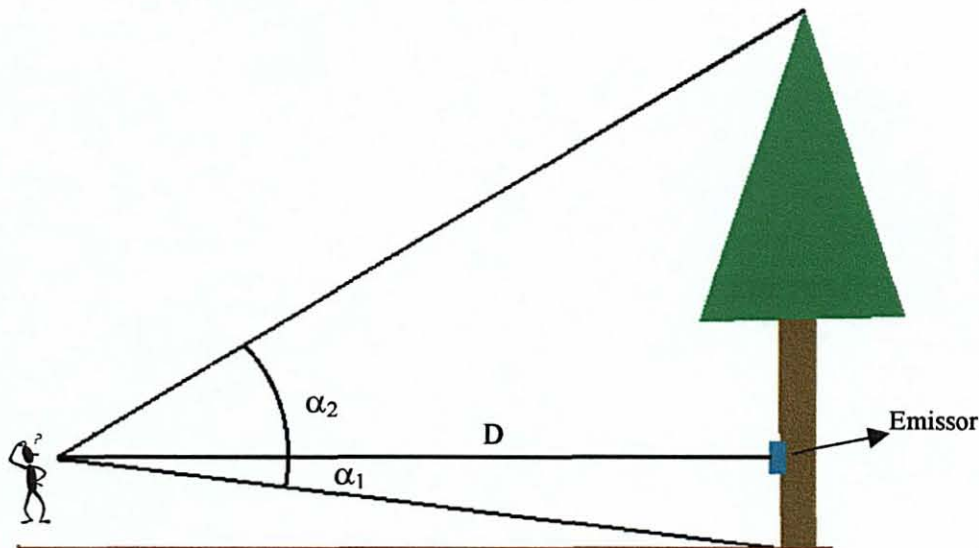
Com uma fita métrica, mediu-se a CAP das árvores. Posteriormente os valores de CAP foram convertidos para valores de DAP (diâmetro a altura do peito) através da fórmula:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi}$$

3.3.6.2 Medição da altura total (H_c)

A altura total das árvores em campo foi determinada com um hipsômetro FORESTOR VERTEX. Este aparelho baseia-se na resolução de triângulos para determinação das alturas das árvores, e consiste de duas unidades: o hipsômetro propriamente dito e um emissor. O emissor é fixado na árvore a 1,30m do solo e o observador afasta-se da mesma de modo que ele possa visualizar o emissor, a base e o topo da árvore. Mirando-se o hipsômetro no emissor o aparelho fornece a distância D do observador à árvore, a qual é determinada através da emissão de pulsos ultrassônicos. Então o observador mira a base da árvore e o aparelho registra o ângulo α_1 . Posteriormente ele mira o topo da árvore e o aparelho registra o ângulo α_2 . Desta forma, a altura da árvore é calculada pelo aparelho considerando as duas medidas de ângulo e a distância. O valor da altura total das árvores foi a média de três medidas tomadas com o hipsômetro (FIGURA 3).

FIGURA 3 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO HIPSSÔMETRO FORESTOR VERTEX



3.3.7 Estimativa do Volume em Campo (V_c)

O volume das árvores em campo foi estimado através de equação de volume para árvores individuais de *Pinus* spp. com casca desenvolvida para a região em ocasião do Inventário Florestal Nacional para Reflorestamentos no Rio Grande do Sul (IBDF, 1983). A equação volumétrica utilizada foi:

$$\log V = -4,0576 + 1,7884 \log d + 0,9204 \log h$$

a qual apresenta um coeficiente de determinação $R^2 = 0,98647$ e um erro padrão da estimativa $S_{xy} = 0,04769$.

O volume obtido com esta equação foi utilizado no ajuste dos modelos de regressão testados com os dados coletados das imagens aéreas.

3.3.8 Restituição Fotogramétrica

Restituição, na sua origem, significa a “reconstrução” do terreno a partir de suas fotografias (ANDRADE, 1998). Esta etapa do trabalho foi executada em uma estação fotogramétrica digital *DVP (Digital Video Plotter)*, a qual apresenta rotinas computacionais e ferramentas adequadas para o registro das informações gráficas do modelo (ver FIGURA 4).

A área de estudo foi recoberta por duas aerofotos, gerando assim apenas um modelo estereoscópico ou estereomodelo.

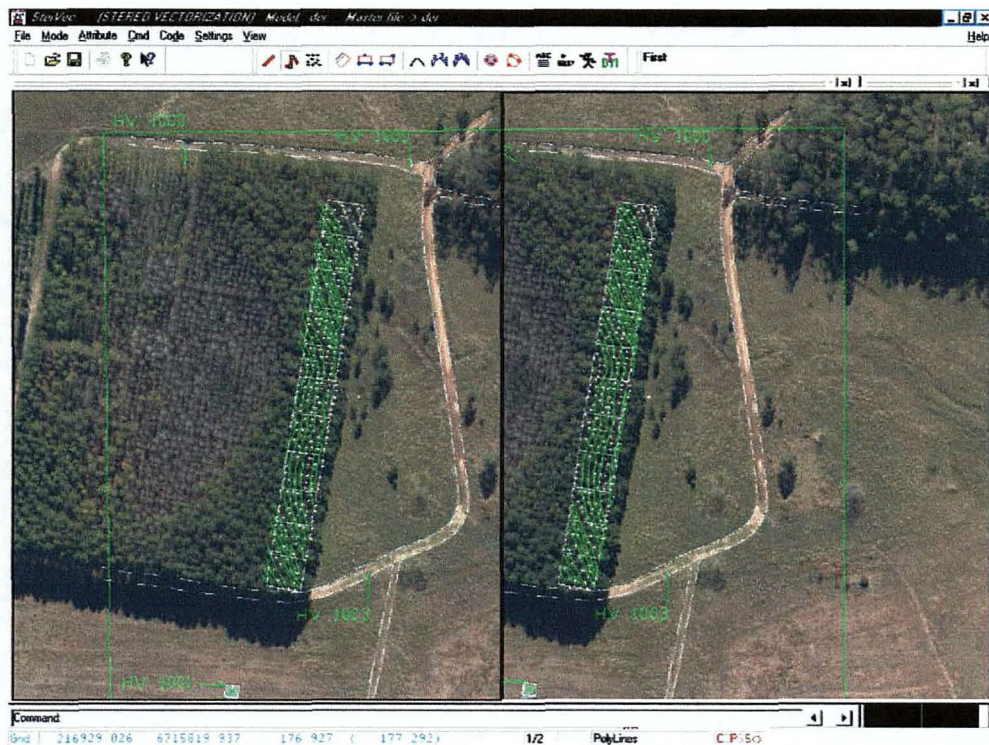
Com a finalidade de formar um estereomodelo com um par de aerofotos e nele efetuar medições, primeiramente torna-se necessário as operações de orientação interna e externa do par de aerofotos.

A orientação interna consiste na operação de recuperação da posição da fotografia em relação à câmera fotográfica. Para isto, as coordenadas de máquina são transformadas para o sistema fotogramétrico utilizando um arquivo com os seguintes parâmetros: coordenadas calibradas das marcas fiduciais, valor das coordenadas do ponto principal, distância focal calibrada e parâmetros das distorções radial simétrica e descentrada.

A orientação externa é realizada em duas etapas, que são as orientações relativa e a absoluta. A orientação relativa tem por objetivo orientar em posição e atitude o par de aerofotos entre si, sem tomar em consideração o referencial terrestre. Neste processo, as paralaxes verticais nos pontos situados na zona de recobrimento das imagens são eliminadas. A orientação absoluta consiste no conjunto de operações necessárias para colocar o modelo em posição, escala e atitude corretos em relação ao referencial cartográfico. Para a realização deste procedimentos, foi gerado um arquivo contendo as coordenadas dos pontos de apoio terrestre no sistema UTM – SAD69, o qual foi utilizado pelo programa computacional da estação DVP.

A etapa seguinte da restituição fotogramétrica consistiu na reconstrução das feições do terreno, em especial as curvas de nível e a copa das árvores, já que as variáveis fotogramétricas de interesse estão diretamente ligadas a essas feições (ver ANEXO 1).

FIGURA 4 – PROCESSO DE RESTITUIÇÃO NA ESTAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DIGITAL *DVP*



3.3.9 Identificação e Medição das Variáveis Dendrométricas nas Imagens Aéreas

A identificação das árvores nas imagens aéreas foi feita seguindo-se rigorosamente o croqui de localização das mesmas confeccionado durante o levantamento de campo. A presença de linhas regulares de plantio facilitou esta etapa do trabalho.

Em se tratando de estimativa volumétrica de árvores individuais de *Pinus taeda* L., no presente trabalho foram medidas nas imagens aéreas as variáveis área da copa e altura das árvores.

3.3.9.1 Medição da área das copas (AC)

Após identificadas nas imagens aéreas as árvores cujas copas foram individualizadas na etapa de restituição fotogramétrica, efetuou-se a medição da área das copas com o comando de medição de área de polígonos do *software* MICROSTATION/j.

3.3.9.2 Medição da altura total (H)

A altura total das árvores nas imagens aéreas foi medida em todas as árvores identificadas. Para a obtenção desta variável, foi necessária a determinação do valor da cota na base e no topo das árvores.

O valor da cota na base das árvores foi determinado em função das curvas de nível do terreno. Para as árvores encontradas sobre as curvas de nível, adotou-se o valor da cota das mesmas. Para as demais árvores, o valor da cota da base foi determinado por interpolação em função das curvas de nível adjacentes.

Para a determinação do valor da cota referente ao topo das árvores, o modelo estereoscópico permaneceu fixo na tela do computador e as marcas flutuantes ajustadas de modo a tangenciar o topo das mesmas. O valor numérico observado no instante da sobreposição das marcas flutuantes foi o valor da cota do topo das árvores.

A altura total das árvores individuais foi determinada subtraindo-se o valor da cota no topo das árvores pelo valor da cota na base das mesmas.

3.3.10 Estudo de Correlação Linear Simples entre Variáveis

A observação da associação entre duas variáveis é possível através de um estudo de correlação linear simples, calculada por:

$$r_{x,y} = \frac{s_{xy}}{\sqrt{(s^2_x) \cdot (s^2_y)}}$$

onde: S_{xy} = covariância de x e y

S^2_x = variância de x

S^2_y = variância de y

3.3.10.1 Volume (V_c) x variáveis pré selecionadas

Um estudo de correlação linear simples foi realizado para observar a associação entre a variável dependente volume e as variáveis independentes pré selecionadas que fariam parte das equações matemáticas testadas para estimar tal variável.

3.3.10.2 CAP x Área da copa (AC)

A circunferência e o diâmetro a altura do peito são variáveis dendrométricas que não podem ser determinadas diretamente em imagens aéreas. Com a finalidade de avaliar o comportamento da variável área de copa obtida nas imagens aéreas em relação à variável CAP determinada em campo, realizou-se um estudo de correlação linear simples entre as variáveis CAP x AC, CAP x AC², e CAP x \sqrt{AC} .

3.3.11 Modelos de Regressão Pré Seleccionados da Literatura

Visando a estimativa volumétrica de árvores individuais de *Pinus taeda* L. em povoamentos homogêneos a partir de variáveis dendrométricas determinadas em imagens aéreas de alta resolução, alguns modelos matemáticos foram pré selecionados da literatura, ajustados e testados pelo Método dos Mínimos Quadrados ou Análise de Regressão. Tendo-se como variável dependente o volume (V_c), determinado pela

equação volumétrica desenvolvida por IBDF (1983), e, como variáveis independentes, área de copa e altura total das árvores medidas nas imagens aéreas, procedeu-se o desenvolvimento estatístico utilizando-se o *software* STATISTICA.

Os modelos matemáticos pré existentes selecionados para o ajuste do conjunto de dados estudado foram agrupados em três grupos. No Grupo 1 encontram-se os modelos matemáticos que consideram o volume apenas em função da altura total (H) (TABELA 1). No Grupo 2 encontram-se os modelos matemáticos que consideram o volume apenas em função da área de copa (AC) (TABELA 2), e no Grupo 3, encontram-se os modelos matemáticos que consideram o volume em função da altura total e da área da copa (TABELA 3).

TABELA 1 – GRUPO 1: MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ALTURA TOTAL.

	Modelo	Autor
1	$V = b_0 + b_1H + b_2 \log H$	OLIVEIRA (1980)
2	$V = b_0 + b_1H + b_2H^2 + b_3 \log H$	OLIVEIRA (1980)

TABELA 2 – GRUPO 2: MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ÁREA DE COPA.

	Modelo	Autor
3	$V = b_0 + b_1AC + b_2 \log AC$	OLIVEIRA (1980) Modificada
4	$V = b_0 + b_1AC + b_2AC^2 + b_3 \log AC$	OLIVEIRA (1980) Modificada

TABELA 3 – GRUPO 3: MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ALTURA TOTAL E ÁREA DA COPA.

	Modelo	Autor
5	$V = b_0 + b_1 H \log AC + b_2 H$	OLIVEIRA (1980)
6	$V = b_0 + b_1 H \log AC$	SAYN-WITTGENSTEIN (1967; 1972)
7	$V = b_0 + b_1 H + b_2 H \sqrt{AC} + b_3 \sqrt{AC}$	SAYN-WITTGENSTEIN (1972)
8	$V = b_0 + b_1 H + b_2 H \sqrt{AC} + b_3 AC$	OLIVEIRA (1980)
9	$V = b_0 + b_1 H \sqrt{AC} + b_2 \sqrt{AC}$	SAYN-WITTGENSTEIN (1972)
10	$V = b_0 + b_1 H^2 + b_2 AC^2 + b_3 (H \cdot AC)$	FONTES (1983) Modificada

3.3.12 Elaboração de Equação de Regressão pelo Método *Stepwise*

A elaboração de uma equação volumétrica que superasse os resultados obtidos com os modelos pré selecionados foi feita através da análise de regressão múltipla pelo método *Stepwise*. O *Stepwise* consiste em um processo de seleção de variáveis que evita se trabalhar com um modelo contendo mais variáveis independentes do que o necessário, sendo recomendado e considerado um dos melhores procedimentos para a seleção de variáveis (DRAPER e SMITH, 1966).

Este processo inicia-se com o modelo mínimo, sendo que a primeira variável a entrar no modelo é a de maior correlação linear simples com a variável dependente. A ordem de inserção é determinada utilizando-se o coeficiente de correlação parcial como uma medida da importância das variáveis que ainda não estão na equação.

O processo acima descrito foi realizado com auxílio do *software* STATISTICA.

3.3.13 Critérios de Seleção da Melhor Equação de Regressão

A avaliação comparativa de todas as equações de regressão para estimar o volume de árvores individuais de *Pinus taeda* L. foi feita com base nos seguintes critérios:

- a) Coeficiente de determinação (R^2);
- b) Erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{xy}\%$);
- c) Teste F ;
- d) Teste de comparação entre os coeficientes de correlação;
- e) Significância dos coeficientes da equação;
- f) Análise dos resíduos.

3.3.13.1 Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de determinação representa a proporção de variação em Y que está associada com a regressão sobre as variáveis independentes, ou seja, mede o quanto a regressão ajusta o conjunto de dados em questão (FREESE, 1964). Portanto, quanto mais o valor de R^2 se aproximar de 1, melhor o modelo estará explicando a variabilidade dos dados.

O valor de R^2 é dado por:

$$R^2 = \frac{SQ_{REG}}{SQ_{TOT}}$$

onde: SQ_{REG} = Soma de Quadrados da Regressão

SQ_{TOT} = Soma de Quadrados Total,

ambos obtidos da Análise de Variância (ANOVA).

Porém, devido a este coeficiente ser crescente a medida que novas variáveis são adicionadas ao modelo, utilizou-se o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) para o número de coeficientes da equação para comparação dos modelos testados.

3.3.13.2 Erro padrão da estimativa (S_{xy}) e erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{xy}\%$)

O erro padrão da estimativa é uma medida de dispersão entre os valores observados e os estimados pela regressão, sendo desejável a obtenção de menores valores de S_{xy} .

O erro padrão da estimativa também é obtido a partir da ANOVA e é dado por:

$$S_{xy} = \sqrt{QM_{RES}}$$

onde: QM_{RES} = Quadrado Médio do Resíduo ou Média Quadrática Residual.

Quando o erro padrão da estimativa é expresso como uma percentagem da média aritmética da variável dependente, obtêm-se o erro padrão da estimativa em percentagem, que é dado por:

$$S_{xy}\% = \frac{S_{xy}}{\bar{Y}} \times 100$$

onde: \bar{Y} = média aritmética da variável dependente.

Neste caso a interpretação é a mesma, ou seja, quanto menor o valor de $S_{xy}\%$, mais precisas serão as estimativas obtidas pela equação.

3.3.13.3 Teste F

O teste F é utilizado para avaliar se o modelo testado representa bem a relação entre X e Y . O valor de F calculado para a equação de regressão é proveniente da Análise de Variância (ANOVA) e é dado por:

$$F = \frac{QM_{REG}}{QM_{RES}}$$

onde: QM_{REG} = Quadrado Médio da Regressão

QM_{RES} = Quadrado Médio do Resíduo

O valor encontrado para a razão F é comparado com o valor de F tabelado em função dos graus de liberdade da regressão e do erro (numerador e denominador, respectivamente), a um nível α de probabilidade pré-estabelecido. Se o valor de F calculado for maior do que de F tabelado, a equação de regressão é estatisticamente significativa, ou seja, representa bem do conjunto de dados.

Na presente pesquisa estabeleceu-se um nível α de probabilidade de 0,05, ou seja, a equação de regressão ajustada estará explicando com confiabilidade 95% da variação do conjunto de dados estudados.

3.3.13.4 Teste de comparação entre os coeficientes de correlação

Este teste consistiu em comparar os valores dos coeficientes de correlação de *Pearson* de duas equações testadas para verificar a existência ou não de diferença estatística significativa entre as mesmas a um nível de probabilidade $\alpha = 0,05$. Quando o valor de p calculado for maior que 0,05 não existe diferença estatisticamente significativa entre as equações testadas.

3.3.13.5 Significância dos coeficientes da equação

O teste de significância dos coeficientes permite avaliar se os coeficientes que compõem o modelo são estatisticamente significantes ou não, ou seja, se eles estão contribuindo para explicar a variabilidade dos dados. O *software* STATISTICA usado no processamento dos dados indica no sumário da regressão quais os coeficientes são significativos no modelo através do teste t . Ele calcula o valor de t e compara com o valor de t tabelado em função da probabilidade α estipulada e do número de graus de liberdade do modelo. Desta forma, o coeficiente é considerado estatisticamente significativo para o modelo se o valor de t calculado for maior do que o valor de t tabelado.

3.3.13.6 Análise dos resíduos

Para a verificação do ajuste da equação selecionada ao longo da amplitude dos dados observados, foi realizada uma análise gráfica da distribuição dos resíduos, fornecidos pela diferença entre os valores da variável dependente observada e da estimada. Esta análise permite detectar possíveis tendências de ajuste ao longo da linha de regressão, indicando superestimativas e subestimativas da variável estimada pela equação de regressão selecionada.

Para que a equação seja considerada corretamente ajustada, os resíduos devem seguir uma distribuição normal, com média igual a zero e variância constante. A análise do relatório dos resíduos gerado pelo programa possibilitou verificar as preposições acima mencionadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE APOIO TERRESTRES

Através do levantamento com GPS pelo método do Posicionamento Estático Relativo obteve-se as coordenadas geodésicas da estação base do campo e dos 4 pontos de apoio. Na TABELA 4 constam os resultados processados deste levantamento em coordenadas geodésicas elipsoidais (φ , λ , h) no referencial WGS-84, e em coordenadas geodésicas cartesianas (N, E, H) no sistema UTM – SAD69.

TABELA 4 – COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO TERRESTRES.

PONTO	φ (° ' ")	N (m)	λ (° ' ")	E (m)	h (m)	H (m)
BASE UFSM	-29 43 04,920	6.709.356,422	-53 43 00,430	237.183,297	129,374	-
BASE HV1005	-29 39 33,290	6.715.378,085	-53 55 36,120	216.702,859	135,075	-
HV1000	-29 39 17,620	6.715.921,655	-53 55 28,113	216.956,150	147,418	148,339
HV1001	-29 39 25,033	6.715.691,07	-53 55 31,481	216.871,321	146,653	142,026
HV1002	-29 39 17,203	6.715.932,003	-53 55 31,805	216.856,510	145,317	140,692
HV1003	-29 39 23,498	6.715.739,992	-53 55 29,039	216.935,814	145,877	141,251

onde: φ , N: latitude;

λ , E: longitude;

h, H: altitude

Observando os resultados do processamento apresentados na TABELA 5, são evidenciados alguns aspectos em relação ao levantamento de pontos GPS, entre eles:

- 1) O RMS (Erro Médio Quadrático) do levantamento foi maior para a determinação das coordenadas conhecidas do ponto HV1005, sendo este 0,010m. Acredita-se que isto ocorreu devido à influência da refração ionosférica, pois o comprimento da linha base entre este ponto e a estação base da UFSM para a qual houve a irradiação foi maior do que para os demais pontos, os quais apresentaram valores do RMS inferiores;
- 2) O menor RMS, de 0,003m, foi obtido na determinação das coordenadas do ponto HV1003;

- 3) O RDOP (*Relative Dilution Of Precision*) consiste na informação referentes a geometria dos satélites visíveis durante a coleta das observações, sendo desejável valores menores para melhores soluções. Avaliando os dados deste levantamento, não é possível estabelecer uma relação entre o RMS e os valores RDOP, e comprimento da linha base, sendo necessário para isto estudos mais aprofundados;
- 4) O valor mais elevado do RDOP no ponto HV1002 pode estar associado a fontes de erro como multicaminhamento e perda de sinais, os quais são muito comuns em locais próximos a reflorestamentos por estes representarem obstáculos à propagação dos sinais dos satélites (GILBERT, 1997).

TABELA 5 – INFORMAÇÕES SOBRE O PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS.

Base	Comprimento Linha Base (m)	Observações	Observações Usadas	RDOP	RMS (m)
UFSM - HV1005	21.347,308	4094	4062	1,30	0,010
HV1005 - HV1000	528,679	2029	2025	1,30	0,007
HV1005 - HV1001	283,379	1218	1216	1,40	0,006
HV1005 - HV1002	509,045	1655	1627	1,80	0,005
HV1005 - HV1003	356,822	1245	1242	1,30	0,003

Outra informação de confiabilidade das soluções para as coordenadas dos pontos levantados que pode ser observada é a fixação da ambigüidade. Quando no processamento são obtidos valores inteiros de ambigüidades, significa que elas foram fixadas ou solucionadas, obtendo-se assim melhor precisão dos ajustes. No presente levantamento observou-se que houve solução das ambigüidades para todos os pontos, indicando que as soluções são confiáveis.

4.2 ESTEREO ORIENTAÇÃO DAS IMAGENS

A orientação do modelo estereoscópico tem seus resultados apresentados na TABELA 6. Comparando-se as coordenadas dos pontos de controle terrestre obtidas a partir do modelo estereoscópico orientado com aquelas provenientes do levantamento com GPS (TABELA 4), observa-se que a diferença entre as mesmas foi submétrica, ajuste semelhante aos obtidos com fotografias provenientes de câmeras métricas.

Avaliando os desvios D_x , D_y e D_z , obtidos na orientação do estereomodelo, percebe-se que eles oscilam entre 0,069 e 0,570m, o equivalente a 0,46 e 3,80 pixels respectivamente. Porém, os desvios padrão gerais encontrados para X, Y e Z são 0,349, 0,297 e 0,406m, o equivalente a 2,32, 1,98 e 2,70 pixels respectivamente.

ANDRADE (2001), em seu trabalho sobre calibração e mensurações dendrométricas com câmeras digitais, utilizando a mesma câmera desta pesquisa, encontrou um erro padrão na calibração de 11,299 pixels, correspondente a 0,169mm. Em suas mensurações dendrométricas, para os alvos artificiais o erro padrão encontrado foi de 0,35 pixel, e, para feições naturais do terreno, de 0,70 pixel. Porém, vale lembrar que o referido trabalho foi desenvolvido em fotogrametria terrestre, onde a distância de tomada das imagens foi em torno de 55m.

TABELA 6 – COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO TERRESTRES NO MODELO ORIENTADO E SEUS RESÍDUOS (m)

PONTO	E	D_x	N	D_y	H	D_z
HV1000	216.955,774	-0,376	6.715.922,112	0,457	147,956	-0,383
HV1001	216.871,196	-0,125	6.715.690,800	-0,270	141,616	-0,410
HV1002	216.857,080	0,570	6.715.931,744	-0,259	140,966	0,274
HV1003	216.935,745	-0,069	6.715.740,064	0,072	141,770	0,519

4.3 IDENTIFICAÇÃO E MEDIÇÕES DAS ÁRVORES NAS IMAGENS AÉREAS

A utilização de imagens aéreas provenientes de câmera digital de pequeno formato calibrada para determinação de variáveis dendrométricas de árvores individuais de *Pinus taeda* L. em povoamentos homogêneos possibilitou a identificação de 314 das 316 árvores medidas em campo, ou seja, 99,37%. Porém, dentre as árvores fotoidentificadas foi possível individualizar com confiabilidade a copa de 139 árvores, o equivalente a 43,99%. Contudo, visando aumentar a confiabilidade dos dados, foram excluídas das análises estatísticas árvores de bordadura, tortas e bifurcadas, restando apenas 126 observações para serem analisadas.

O número reduzido de copas individualizadas com confiabilidade em relação ao número de árvores fotoidentificadas foi em função de dois fatores principais:

- 1) À irregularidade das copas devido ao crescimento desuniforme dos galhos;
- 2) Ao crescimento desuniforme das árvores em altura, pois não foi possível a individualização com confiabilidade das copas das árvores de menor porte.

Nas TABELAS 7 e 8 podem ser visualizadas as estatísticas descritivas das variáveis dendrométricas medidas em campo e nas imagens aéreas que foram consideradas nas análises estatísticas.

Comparando-se os desvios padrões das alturas totais determinadas em campo e nas imagens aéreas, percebe-se que aquele resultante das observações de campo foi menor do que o resultante das observações nas imagens aéreas. Isto pode ser explicado por três motivos: 1) ao desvio padrão em Z resultante da estereo orientação do modelo, que foi de 0,406m; 2) à acurácia na restituição das curvas de níveis; 3) à acurácia na determinação da cota no topo das árvores.

TABELA 7 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS MEDIDAS EM CAMPO E UTILIZADAS NAS ANÁLISES.

Variável	n	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão	Variância da Amostra
CAP (cm)	126	60	83,0317	114	12,7065	161,4550
Altura Total (H_c) (m)	126	21,93	25,5075	28,99	1,6694	2,7869

TABELA 8 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS MEDIDAS NAS IMAGENS AÉREAS E UTILIZADAS NAS ANÁLISES.

Variável	n	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão	Variância da Amostra
Área de copa (AC) (m ²)	126	2,79	5,6352	15,86	2,2091	4,8801
Altura Total (H) (m)	126	17,50	22,44	28,60	2,1393	4,5767

4.4 ESTUDO DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES

4.4.1 Volume x Variáveis Pré Seleccionadas

Na TABELA 9 é possível visualizar a matriz de correlação entre a variável dependente volume e as variáveis independentes que irão compor os modelos matemáticos pré selecionados.

A variável área de copa (AC) apresentou melhor correlação com o volume do que a variável altura (H), sendo que a forma combinada $\log AC$ apresentou a mais alta correlação, de 0,75, e, como variável AC, de 0,72. Comparando os resultados apresentados com os obtidos por OLIVEIRA (1980) para *Araucaria angustifolia*, observa-se o oposto, sendo a correlação de AC com o volume ($r = 0,83$) maior do que a correlação $\log AC$ ($r = 0,66$).

A variável H e suas combinações testadas H^2 e $\log H$ não mostraram-se altamente correlacionadas com o volume ($r = 0,59$). Em seu estudo, OLIVEIRA (1980) encontrou valor idêntico para a correlação de H com o volume, porém, superior para H^2 ($r = 0,67$) e $\log H$ ($r = 0,64$).

Uma análise considerando a variável combinada H e AC para estimativa do volume mostrou que as variáveis $H \cdot \sqrt{AC}$ e $H \cdot \log AC$ apresentaram a maior correlação com o volume ($r = 0,84$), seguido da variável $H \cdot AC$ ($r = 0,79$). Para a primeira variável mencionada, OLIVEIRA (1980) encontrou uma correlação de 0,87 e, para a segunda, de 0,80.

TABELA 9 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE VOLUME E VARIÁVEIS INDEPENDENTES

Variáveis	V_c	AC	AC^2	\sqrt{AC}	$\log AC$	H	H^2	$\log H$	$H*\sqrt{AC}$	$H*AC$	$H*\log AC$
V_c	1,00										
AC	0,72	1,00									
AC^2	0,65	0,97	1,00								
\sqrt{AC}	0,74	0,99	0,94	1,00							
$\log AC$	0,75	0,97	0,89	0,99	1,00						
H	0,59	0,25	0,19	0,27	0,29	1,00					
H^2	0,59	0,23	0,17	0,26	0,28	1,00	1,00				
$\log H$	0,59	0,26	0,19	0,28	0,30	1,00	0,99	1,00			
$H*\sqrt{AC}$	0,84	0,90	0,83	0,92	0,92	0,62	0,62	0,63	1,00		
$H*AC$	0,79	0,98	0,94	0,98	0,96	0,44	0,43	0,44	0,97	1,00	
$H*\log AC$	0,84	0,90	0,81	0,92	0,93	0,61	0,60	0,61	1,00	0,96	1,00

4.4.2 CAP x Área de Copa

O resultado do grau de associação linear entre as variáveis CAP determinado em campo e área de copa determinada nas imagens aéreas pode ser visualizado na TABELA 10.

TABELA 10 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE CAP E ÁREA DA COPA

Variáveis	CAP	AC	AC^2	\sqrt{AC}
CAP	1,00			
AC	0,7397	1,00		
AC^2	0,6716	0,9710	1,00	
\sqrt{AC}	0,7594	0,9928	0,9365	1,00

Como pode ser observado na matriz de correlação acima apresentada, a variável que apresentou maior correlação linear simples com o CAP foi \sqrt{AC} , com $r = 0,7594$.

A distribuição dos pontos que representam as relações acima em um eixo de coordenadas cartesianas é apresentada nas FIGURAS 5, 6 e 7, respectivamente.

FIGURA 5 – RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE CAP E AC.

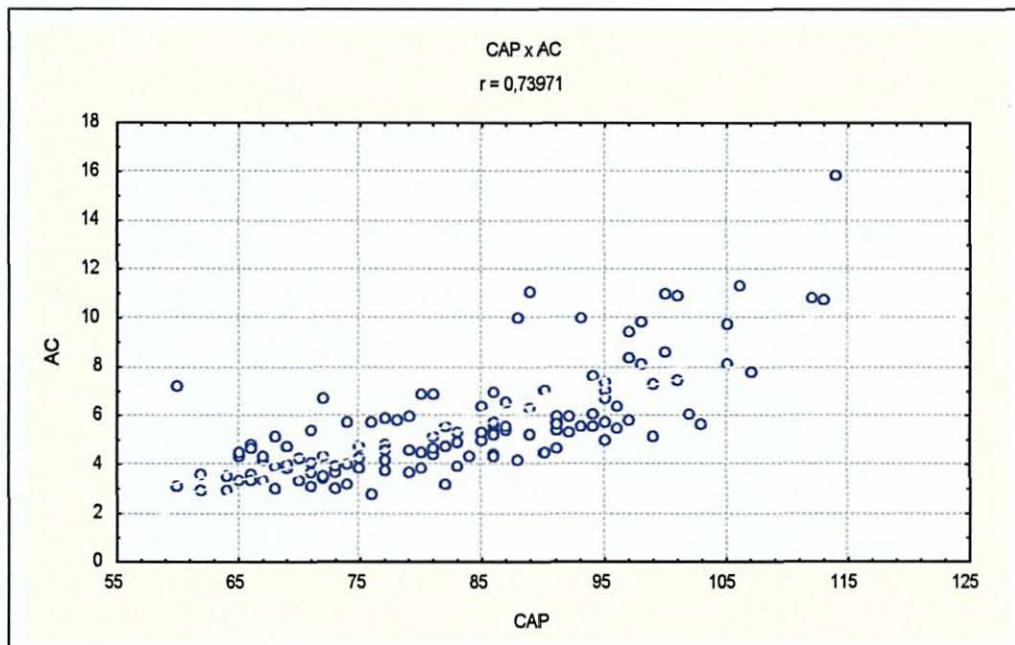
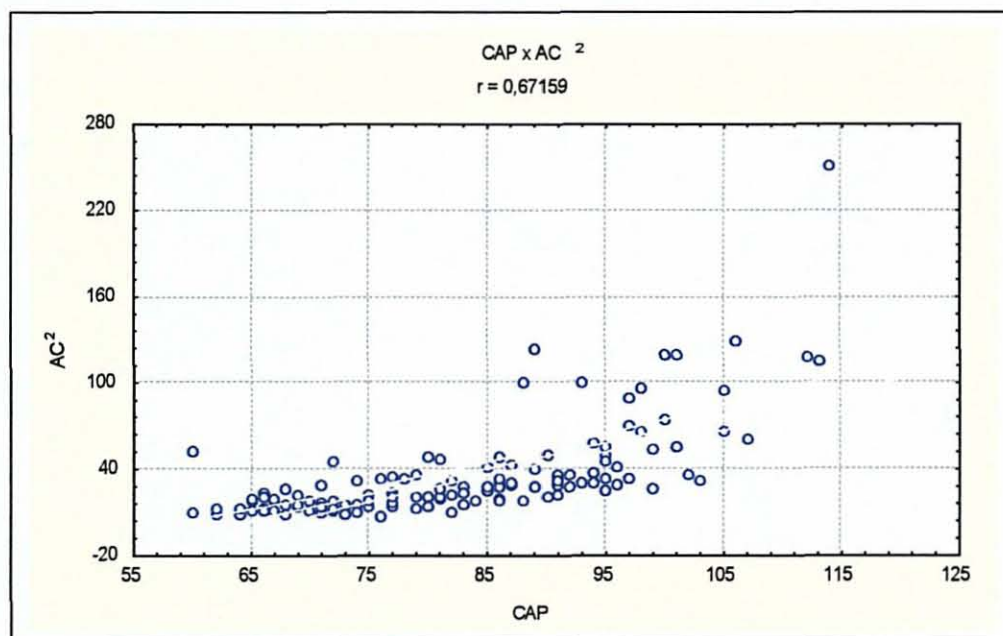
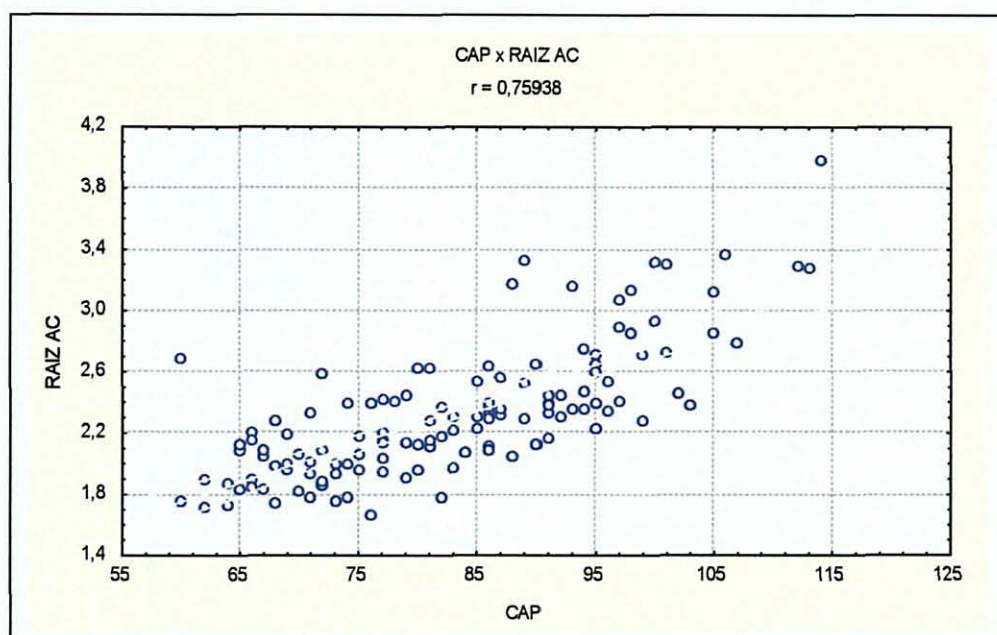
FIGURA 6 – RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE CAP E AC².

FIGURA 7 – RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE CAP E \sqrt{AC} .

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO

4.5.1 Equações de Regressão Ajustadas pelos Modelos de Regressão Pré Seleccionados

Nas TABELAS 11 a 13 são apresentados os três grupos de equações de regressão ajustadas a partir dos modelos matemáticos pré seleccionados para estimar o volume de árvores individuais de *Pinus taeda* L. com as respectivas estatísticas de ajuste e precisão.

Analisando as estatísticas das equações volumétricas ajustadas, observa-se que obtiveram melhor desempenho as do Grupo 3, que consideram as variáveis independentes altura total e área da copa na estimativa da variável dependente volume. Essas equações explicam em torno de 70% da variação total do conjunto de dados estudado ($R^2_{aj} \cong 0,70$), com um erro $S_{xy}\% \cong 17$. As piores equações foram as do Grupo 1, que consideraram apenas a altura total das árvores como variável independente, apresentando um $R^2_{aj} \cong 0,34$ e um $S_{xy}\% \cong 25,40$.

SPURR (1960) mencionou que, em geral, os erros obtidos na estimativa de volume de árvores individuais utilizando fotografias aéreas são altos, variando entre 30 e 60%. Assim sendo, considerando apenas o critério Erro Padrão da Estimativa, verificou-se um bom ajuste para todas as equações, já que o maior erro ficou em torno de 25% e, o menor, em torno de 17%.

Embora a diferença entre as estatísticas obtidas para as equações de regressão dentro de cada grupo tenha sido pequena, aplicou-se o teste de comparação entre os coeficientes de correlação múltipla (R) para verificar se esta diferença foi estatisticamente significativa ao nível de probabilidade de 95% ($\alpha = 0,05$). Dentro dos grupos não foi observada diferença estatística significativa entre as equações, ou seja, todas representam igualmente a variabilidade dos dados. Porém, entre os diferentes grupos, o teste de comparação entre os coeficientes de correlação mostrou haver diferença estatística significativa entre as equações, sendo esta diferença maior entre os Grupos 1 e 3.

Observando-se os valores de F de todas as equações ajustadas e as análises realizadas pelo *software* STATISTICA (ANEXO 2), conclui-se que todas as equações são estatisticamente significativas, ou seja, representam bem a relação entre variáveis dependente e independente.

TABELA 11 – GRUPO 1: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ALTURA TOTAL.

Equações	Estatísticas					
	Coeficientes	R^2_{aj}	R	S_{xy}	$S_{xy}\%$	F
1) $V = b_0 + b_1H + b_2 \log H$	-2,26890 0,01135 1,90055	0,3434	0,5860	0,1397	25,4046	33,69*
2) $V = b_0 + b_1H + b_2H^2 + b_3 \log H$	-21,94220 -1,08450 0,01210 30,14530	0,3399	0,5830	0,1401	25,4773	22,45*

TABELA 12 – GRUPO 2: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ÁREA DA COPA.

Equações	Estatísticas					
	Coefficientes	R ² _{aj}	R	S _{xy}	S _{xy} %	F
3) $V = b_0 + b_1 AC + b_2 \log AC$	-0,12294 -0,01173 1,02177 *	0,5522	0,7431	0,1154	20,9856	78,08*
4) $V = b_0 + b_1 AC + b_2 AC^2 + b_3 \log AC$	-0,08467 0,02701 -0,00133 0,73424	0,5490	0,7409	0,1158	21,0584	51,72*

TABELA 13 – GRUPO 3: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DA ALTURA TOTAL E ÁREA DA COPA.

Equações	Estatísticas					
	Coefficientes	R ² _{aj}	R	S _{xy}	S _{xy} %	F
5) $V = b_0 + b_1 H \log AC + b_2 H$	-0,21711 0,01110 * 0,03173 *	0,7087	0,8418	0,0931	16,9303	153,05*
6) $V = b_0 + b_1 H \log AC$	-0,02526 0,03523 *	0,6989	0,8360	0,0946	17,2031	291,21*
7) $V = b_0 + b_1 H + b_2 H \sqrt{AC} + b_3 \sqrt{AC}$	-0,69754 0,02947 0,00212 0,20295	0,7060	0,8402	0,0935	17,0031	101,06*
8) $V = b_0 + b_1 H + b_2 H \sqrt{AC} + b_3 AC$	-0,18632 0,00417 0,01321 * -0,00946	0,7047	0,8394	0,0937	17,0394	100,47*
9) $V = b_0 + b_1 H \sqrt{AC} + b_2 \sqrt{AC}$	-0,03791 0,01480 * -0,08209	0,7053	0,8398	0,0936	17,0213	150,58*
10) $V = b_0 + b_1 H^2 + b_2 AC^2 + b_3 (H \cdot AC)$	0,00459 0,00038 * -0,00177 0,00327 *	0,7021	0,8379	0,0941	17,1122	99,22*

4.5.2 Equação de Regressão Ajustada pelo Método *Stepwise*

A equação de regressão ajustada pelo método *Stepwise* é apresentada na TABELA 14. Analisando o grau de associação entre as variáveis testadas, conclui-se que aquelas que compuseram esta equação foram as que apresentaram a primeira e a segunda maior correlação com a variável dependente, ou seja, $H \cdot \sqrt{AC}$ ($r = 0,84$) e $H \cdot AC$ ($r = 0,79$).

Observando a TABELA 14, percebe-se que a equação ajustada pelo método *Stepwise* apresentou estatísticas de ajuste e precisão muito semelhantes às apresentadas pelas equações do Grupo 3, com $R^2_{aj} = 0,7089$ e $S_{xy}\% = 16,91$. Aplicando-se o teste de comparação entre o coeficiente de correlação desta equação com as do Grupo 3, verificou-se não haver diferença estatística significativa entre as mesmas.

Segundo o teste *F*, esta equação representa bem a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes (ANEXO 3), da mesma forma que as demais equações ajustadas.

TABELA 13 – EQUAÇÃO DE REGRESSÃO AJUSTADA PELO MÉTODO *STEPWISE*.

Equações	Estatísticas					
	Coefficientes	R^2_{aj}	R	S_{xy}	$S_{xy}\%$	F
11) $V = b_0 + b_1 H \sqrt{AC} + b_2 (H \cdot AC)$	-0,22378 0,01791 * -0,00133 *	0,7089	0,8419	0,0930	16,9121	153,24*

4.6 SELEÇÃO DA MELHOR EQUAÇÃO DE REGRESSÃO

Para a seleção da melhor equação de regressão, foram considerados os critérios mencionados no item 3.3.13. Pelo fato das equações que apresentaram os melhores estimadores R^2_{aj} e $S_{xy}\%$ não apresentarem diferença significativa entre si, conforme mostrou o teste de comparação entre os coeficientes de correlação, e o valor de *F* ser significativo para todas as equações estudadas, o próximo passo consistiu em verificar a significância estatística dos coeficientes das equações.

Com base na análise da significância estatística dos coeficientes das equações, foram eliminadas as equações número 6, 7, 8, 9 e 10, havendo empate entre as equações 5, apresentada por OLIVEIRA (1980) para *Araucaria angustifolia*, e 11, ajustada pelo método *Stepwise*, sendo que ambas apresentaram significância estatística de todos os coeficientes a uma probabilidade de 95%.

Desta forma, selecionou-se as equações 5 e 11 como sendo as que melhor representam a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes,

apresentando um coeficiente de determinação $R_{aj}^2 = 0,70$ e um erro padrão da estimativa $S_{xy}\% = 16,9$.

Comparando os ajustes alcançados pela equação número 5, proposta por OLIVEIRA (1980), para os dados desta pesquisa, com os alcançados para os dados originais com *Araucaria angustifolia*, observa-se que o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{xy}\%$) obtidos por essa autora foram, respectivamente, 0,6471 e 43,57.

Nas FIGURAS 8 e 9 podem ser visualizadas as distribuições gráficas dos volumes observados e estimados em torno da linha de ajuste da regressão pelas equações 5 e 11, respectivamente.

FIGURA 8 – VOLUME OBSERVADO VS. VOLUME ESTIMADO DA EQUAÇÃO 5
 $V = b_0 + b_1 H \log AC + b_2 H$

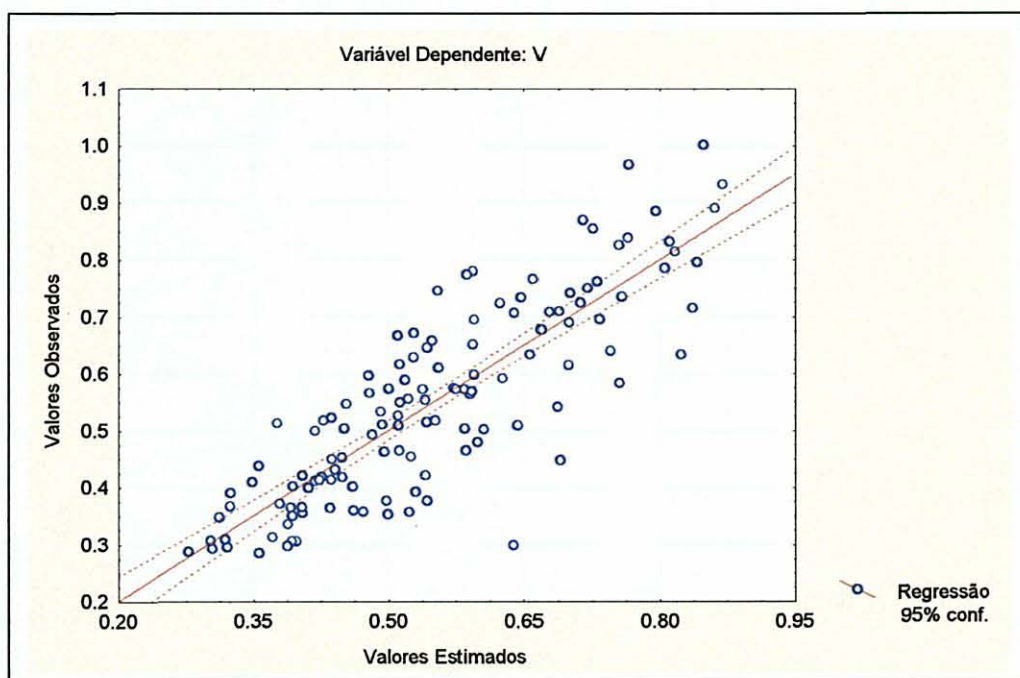
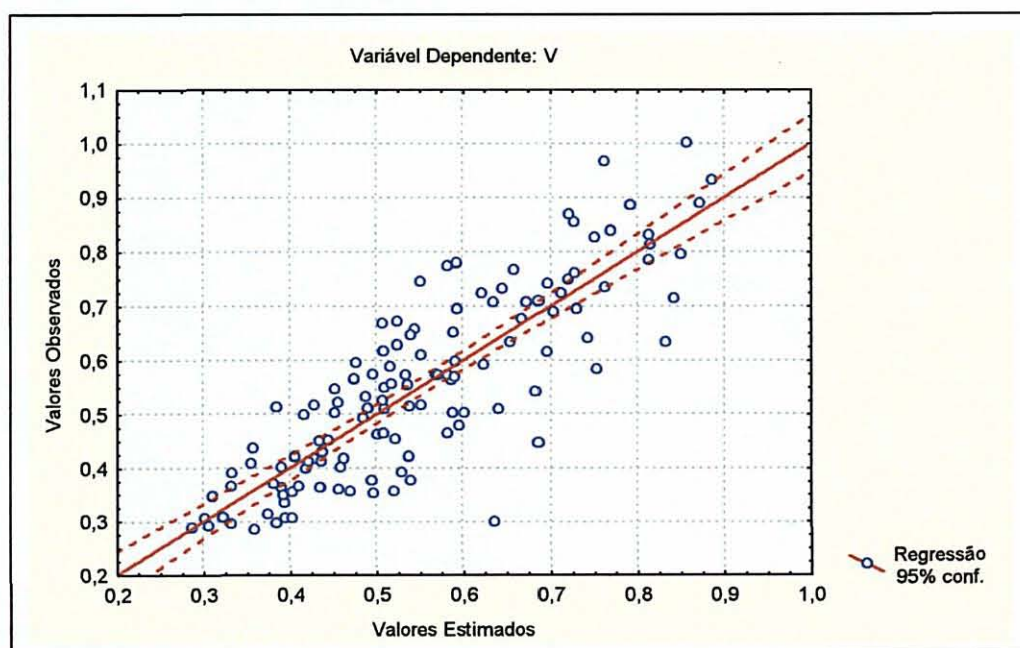


FIGURA 9 – VOLUME OBSERVADO VS. VOLUME ESTIMADO DA EQUAÇÃO 11
 $V = b_0 + b_1 H \sqrt{AC} + b_2 (H \cdot AC)$



4.7 ANÁLISE DOS RESÍDUOS

A distribuição dos resíduos, fornecidos pela diferença entre os valores obtidos pela equação volumétrica desenvolvida para a região e os valores obtidos pelas equações de regressão 5 e 11, são apresentadas nas FIGURAS 10 e 11. Examinando-se estes gráficos, percebe-se que os resíduos apresentam-se normalmente distribuídos, com média zero e variância constante para ambas as equações.

FIGURA 10 - VOLUME ESTIMADO VS. RESÍDUOS DA EQUAÇÃO 5
 $V = b_0 + b_1 H \log AC + b_2 H$

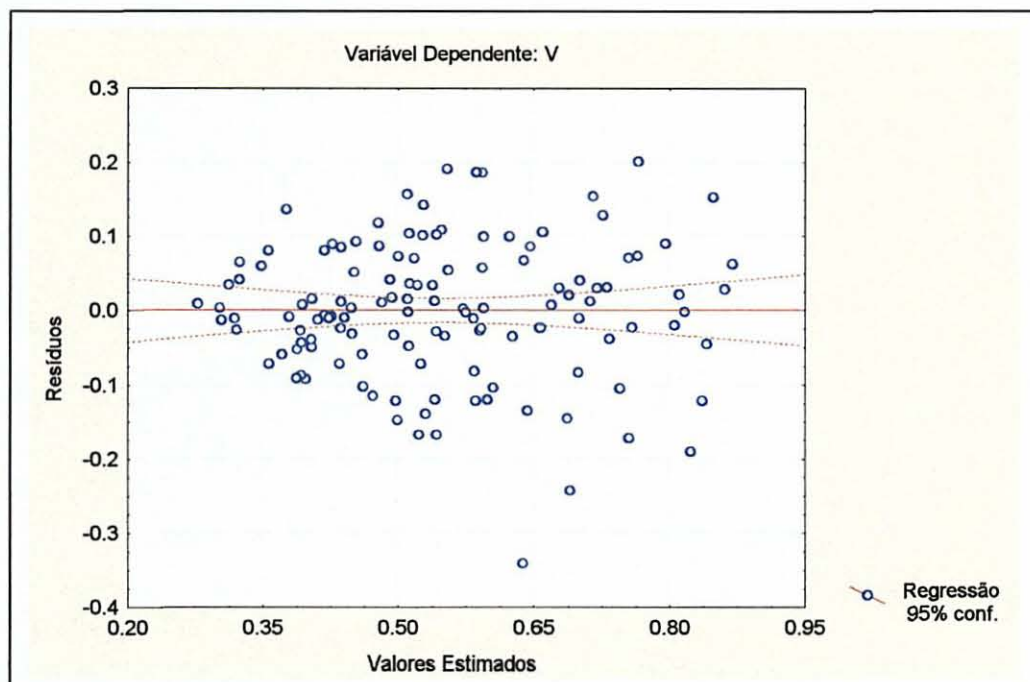
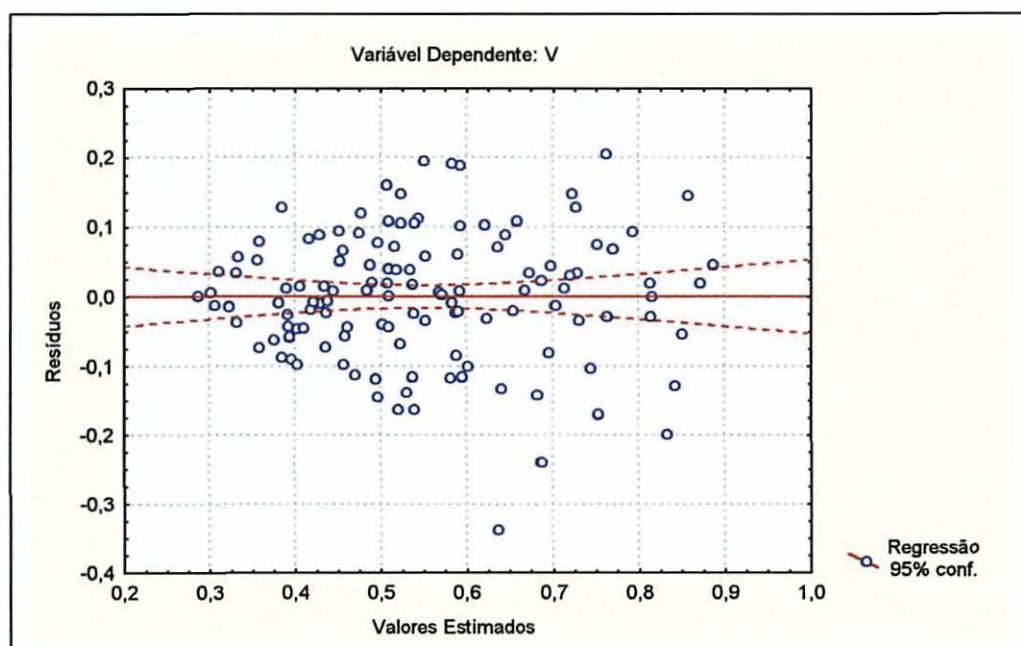


FIGURA 11 - VOLUME ESTIMADO VS. RESÍDUOS DA EQUAÇÃO 11
 $V = b_0 + b_1 H \sqrt{AC} + b_2 (H \cdot AC)$



5 CONCLUSÃO

A obtenção de informações dendrométricas para estimativa de volume de povoamentos florestais com rapidez e precisão encontra como alternativa aos trabalhos de campo, os inventários florestais realizados com informações provenientes de imagens aéreas.

Por meio de imagens aéreas digitais de alta resolução obtidas com câmera digital calibrada é possível identificar e efetuar medições confiáveis em árvores individuais de *Pinus taeda* L. em povoamentos homogêneos. Dentre as variáveis dendrométricas medidas nas imagens, altura total e área de copa, encontrou-se maior dificuldade na medição desta última, especialmente nas regiões com menor densidade de árvores, pois o crescimento irregular dos galhos propiciado pela entrada de luz nessas regiões do povoamento dificultou a individualização das copas.

Dentre as dez equações de regressão pré selecionadas da literatura e a equação gerada pelo método *Stepwise* para estimar o volume de árvores em função de variáveis dendrométricas medidas nas imagens aéreas, houve empate entre as equações número 5, proposta por OLIVEIRA (1980), e número 11, gerada pelo método *Stepwise*. Ambas apresentaram valores R^2_{aj} de 0,7087 e 0,7089 e $S_{xy}\%$ de 16,9303 e 16,9321 respectivamente, além de significância do valor de F, significância de todos os coeficientes e resíduos normalmente distribuídos. Desta forma, tem-se as equações selecionadas:

$$\text{Equação 5: } V = -0,2171 + 0,0111(H \log AC) + 0,0317(H)$$

$$\text{Equação 11: } V = -0,2237 + 0,0179(H \sqrt{AC}) - 0,0013(H \cdot AC)$$

Apesar desta metodologia ter apresentado resultados satisfatórios na estimativa volumétrica de árvores de *Pinus taeda* L., algumas informações obtidas a partir de inventários florestais realizados em campo não podem ser obtidas em imagens aéreas, como altura comercial das árvores, qualidade do fuste, características essas que não podem ser visualizadas em imagens aéreas. Porém, ao se trabalhar com

florestas clonais este fato torna-se pouco significativo, já que não existem diferenças genéticas entre as árvores.

Embora a tecnologia adotada esteja disponível no mercado, dentre os fatores limitantes à sua aplicação em escala comercial está a resistência de muitas empresas e profissionais do setor florestal à abertura para novas tecnologias, especialmente devido à falta de conhecimento do seu potencial e à ampla difusão e domínio dos métodos tradicionais de inventário florestal. Porém, a eficácia da metodologia apresentada não apenas em relação aos resultados obtidos, mas também ao número reduzido de pessoas envolvidas na atividade para a obtenção das informações em um curto espaço de tempo, pode vir a despertar maiores interesses. De qualquer maneira, é recomendado que sejam realizados estudos aprofundados da relação custo/benefício antes de se optar pela adoção ou não da metodologia.

Esta pesquisa explorou apenas uma pequena parte da dendrometria, que foi a estimativa do volume das árvores com a aplicação da fotogrametria digital não convencional. No entanto, uma porta foi aberta para a exploração do assunto, o que poderá trazer grandes contribuições para o setor florestal.

6 RECOMENDAÇÕES

A metodologia aplicada nesta pesquisa pode ser de grande valia em diversos estudos sobre o ecossistema florestal, por exemplo:

- estabelecer relações hipsométricas para plantios florestais;
- realização de inventários florestais em áreas de difícil acesso;
- estudos de acompanhamento do crescimento de espécies florestais de grande interesse econômico especialmente em áreas extensas e de difícil acesso, como o caso do mogno na Amazônia.

Aumentando-se a altura de vôo é possível obter uma área de maior cobertura do terreno por imagem, com resolução do pixel inferior a 15cm, e viabilizar a técnica para fins de inventários florestais em áreas extensas. Porém, estudos deverão ser realizados para avaliar a acurácia dos dados obtidos com essas imagens de menor resolução.

Em áreas onde as florestas cobrem a totalidade da imagem, recomenda-se o estabelecimento de pontos de apoio terrestre em árvores pré-sinalizadas. Porém, a utilização de antenas GPS que ultrapassem o dossel seria fundamental para se obter coordenadas precisas dos pontos de apoio terrestre.

A criação de modelos matemáticos que relacionem dados digitais com dados de campo otimizaria o processo de avaliação quantitativa dos povoamentos florestais, permitindo a geração de imagens que possibilitem a visualização direta na tela do computador dos valores de volume, biomassa, e outros dados quantitativos relacionados aos povoamentos.

Para aumentar a acurácia nas estimativas volumétricas de povoamentos florestais, aliadas às técnicas de aerofotogrametria poderão ser realizadas cubagens das árvores para se determinar o fator de forma real do povoamento utilizando técnicas de fotogrametria terrestre.

Uma nova tecnologia que está a disposição dos usuários da fotogrametria é o Perfilamento a LASER, cujo princípio básico de funcionamento é a obtenção de registros contínuos de coordenadas espaciais pela emissão de pulsos de luz (LASER),

que além de permitir a obtenção de Modelos Digitais do Terreno (MDT) e restituição automática das curvas de níveis, também permite a determinação de altura da vegetação. Estudos avançados sobre a associação desta tecnologia com a metodologia proposta nesta pesquisa poderão ser desenvolvidos com a finalidade de aumentar a eficiência e a acurácia na determinação volumétrica de povoamentos florestais.

REFERÊNCIAS

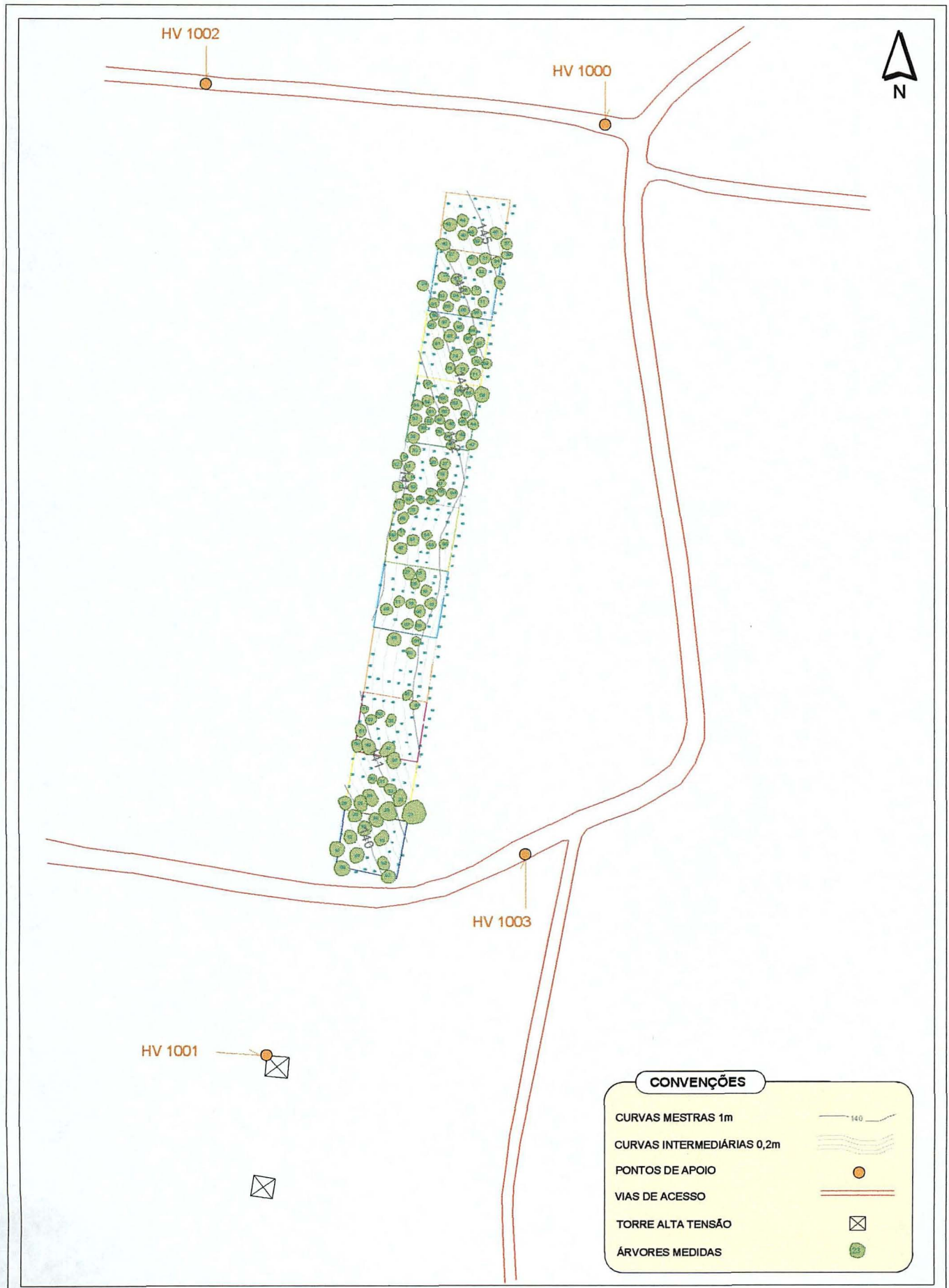
- ALDRED, A.H.; SAYN-WITTGENSTEIN, L. **Tree diameter and volume from large scale aerial photographs.** Environment Canada, Canadian Forest Service, Forest Management Institute Information Report, Ottawa: FMR-X-40, 1972.
- ALDRED, A.H.; KIPPEN, F.W. Plot volumes from large-scale 70mm air photographs. **Forest Science.**, v.13, n.4, p.419-426, 1976.
- ALDRED, A.H.; LOWE, J.J. **Application of large-scale photos to a forest inventory in Alberta.** Environment Canada, Canadian Forest Service, Forest Management Institute Information Report, Ottawa: FMR-X-107, 1978.
- ANDRADE, J.B. **Fotogrametria.** Curitiba: Editora SBEE, 1998. 258p.
- ANDRADE, R.R. **Mensurações dendrométricas com câmeras digitais calibradas.** Curitiba, 2001. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná..
- BIGGS, P.H.; SPENCER, R.D. New approaches to extensive forest inventory in Western Australia using large-scale aerial photography. **Australian Forestry**, v.53, n.3, p.182-193, 1990.
- BONNOR, G.M. **Forest Inventories with large-scale aerial photographs: an operation trial in Nova Scotia.** Environment Canada, Canadian Forest Service, Forest Management Institute Information Report,, Ottawa: FMR-X-96. 1977.
- DILWORTH, J.R. **Log scaling and timber cruising.** Corvalis, 1977. 468p.
- DRAPER, N.R.; SMITH, A. **Applied Regression Analysis.** New York, John Wiley & Sons, 1966. 407p.
- EMBRAPA. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado do Paraná.** Brasília, CNPF, 1986. 89p.
- FONTES, J.M. **Estimativa volumétrica individual de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., através de fotografias aéreas em grande escala.** Curitiba, 1983. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- FREESE, F. **Linear regression methods for forest research.** U.S. Forest Service Research Paper, Madison: FPL 17, 1964. 137p.
- GAGNON, P.A.; AGNARD, J.P.; NOLETE, C. Evaluation of a soft-copy photogrammetry system for tree-plot measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v.23, p.1781-1785, 1993.

- GILBERT, C. Erros em GPS. **Fator GIS**, v.5, n.19, p.62-63, 1997.
- GRAHAM, R.W. Kodak digital cameras for small format aerial photography. **Photogrammetric Record**, v.15, n.86, p.325-327, 1995.
- GRUNER, H. Photogrammetry: 1776-1976. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.43, n.5, p.469-74, 1977
- HALL, R.J.; MORTON, R.T.; NESBY, R.N. A comparison of existing models for dbh estimation from large scale photos. **The Forestry Chronicle**, v.65, n.4, p.114-119. 1989.
- HUSCH, B. **Forest mensuration and statistics**. New York: Ronald Press, 1963. 473p.
- IBDF. **Inventário Florestal Nacional**. Brasília, Departamento de Economia Florestal, 1983. 182p.
- IPRNR. **Levantamento Semidetalhado dos Solos da Estação Experimental de Silvicultura de Santa Maria**. Porto Alegre, 1988.
- JENSEN, J.R. **Introductory Digital Image Processing**. New Jersey: Prentice-Hall, 1986. 378p.
- KOVATS, M. A large-scale photographic technique for measuring tree heights on long term forest installations. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.63, n.6, p.741-747, 1997.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. New York : John Wiley & Sons, 3. ed., 1994.
- LUGNANI, J.B.; DALMOLIN, Q.; QUINTINO, M.J. **Introdução à Fotogrametria – 2ª Parte**. Curitiba: UFPR, 1977. 107p.
- LOETSCH, F. & HALLER, K.W. **Forest Inventory**. Berlin: B.L.V.,v.1, 1973. 436p.
- MAKAY, E. **Dasometria**. Madrid, Escuela Técnica de Ingeniero de Montes, 1964. 759p.
- MILLS, J.P.; NEWTON, I.; GRAHAM, R.W. Aerial photography for survey purposes with a high resolution, small format, digital camera. . **Photogrammetric Record**, v.15, n.88, p.575-587, 1996.
- MIROV, N.T. **The genus *pinus***. New York, Ronald Press, 1967. 602 p.
- NIELSEN, U.; ALDRED, A.H.; MACLEOD, D.A. A forest inventory in the Yukon using large scale photo sampling techniques. **Information Report**, Forest Management Institute, Ottawa: FMR-X-121. 1979.

- OLIVEIRA, Y.M.M. **Correlação entre parâmetros dendrométricos em *Araucaria angustifolia*, utilizando fotografias aéreas.** Curitiba, 1980. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- PITT, D.G.; WAGNER, R.G.; HALL, R.J.; KING, D.J.; LECKIE, D.G.; RUNESSON, U. Use of remote sensing for forest vegetation management: a problem analysis. **The Forestry Chronicle**, v.73, n.4, p.459-477, 1997.
- SAYN-WITTGENSTEIN, L.; ALDRED, A.H. Tree volumes from large scale photos. **Photogrammetric Engineering**, v.33, n.1, p.69-73, 1967.
- SAYN-WITTGENSTEIN, L.; ALDRED, A.H. Tree size from large-scale photos. **Photogrammetric Engineering**, v.38, n.10, p.971-973, 1972.
- SCHENK, T.; TOTH, C. Knowledge-Based Systems for Digital Photogrammetric Workstations. **Digital Photogrammetric Systems**, Wichman, Karlsruhe, Germany. p123-134, 1991
- SPENCER, R.D. Large-scale aerial photographic systems for forest sampling in Canada. **Canadian Survey**. v.41, n.1, p.9-21, 1987.
- SPURR, S.H.; BROWN JR, C.T. Tree height measurements from aerial photographs. **J. For.**, v.44, n.10, p.716-721, 1946.
- SPURR, S.H.,. **Forest Inventory**. New York: The Ronald Press Company, 1952. 476p.
- SPURR, S.H. **Photogrammetry and photo-interpretation**. New York: The Ronald Press Company, 1960. 472p.
- TEIXEIRA, A.L.A.; CHRISTOFOLETTI, A. **Sistemas de Informações Geográficas (Dicionário Ilustrado)**. São Paulo: Editora Hucitec, 1997. 244p.
- TITTUS, S.J.; MORGAN, D.J. Tree height: Can large scale photos be more accurate than field measurements? **The Forestry Chronicle**, v.61, n.3, p.214-217, 1985.
- TOMMASELLI, A.M.G. Fotogrametria Digital. **Infogeo**, v.março/abril, p.63-65, 2000.
- UBIALLI, J.A. **Tabelas de volume para *Pinus taeda* L. nos principais eixos de reflorestamento do Estado do Paraná.** Curitiba, 1981. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- WARNER, W.S.; BLANKENBERG, L.E. Bundle adjustment for 35mm oblique aerial photography. **Photogrammetric Record**, v.15, n.86, p.217-224, 1995.
- WARNER, W.S.; SLAATTELID, B.R. Multiplotting with images from the Kodak DCS420 digital camera. **Photogrammetric Record**, v.15, n.89, p.665-672, 1997.

ANEXOS

ANEXO 1 – MAPA PLANIALTIMÉTRICO DA ÁREA DE ESTUDO



ANEXO 2 – RELATÓRIOS DE AJUSTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PRÉ SELECIONADAS

MODELO 1:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
6	H _f	8.3	-9999	
8	LOGH	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,594937340
 Multiple R-Square: ,353950439
 Adjusted R-Square: ,343445568
 Number of cases: 126
 F (2, 123) = 33,69394 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,139743946
 Intercept: -2,268899436 Std.Error: 4,056715 t(123) = -,5593 p < ,576978

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	Regression Summary for Dependent Variable: V					
MULTIPLE	R= ,59493734	R ² = ,35395044	Adjusted R ² = ,34344557			
REGRESS.	F(2,123)=33,694	p<,00000	Std.Error of estimate: ,13974			
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(123)	p-level
Intercpt			-2,26890	4,056716	-,559295	,576978
H _f	,140731	1,056678	,01135	,085185	,133182	,894267
LOGH	,454460	1,056678	1,90055	4,419029	,430083	,667888

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	1,315975	2	,657988	33,69394	,000000
Residual	2,401990	123	,019528		
Total	3,717965				

MODELO 2:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
6	H _f	8.3	-9999	
7	H ²	8.3	-9999	
8	LOGH	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,596439347
 Multiple R-Square: ,355739894
 Adjusted R-Square: ,339897433
 Number of cases: 126
 F (3, 122) = 22,45484 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,140121038
 Intercept: -21,94224304 Std.Error: 34,04015 t(122) = -,6446 p < ,520397

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	Regression Summary for Dependent Variable: V					
MULTIPLE	R= ,59643935	R ² = ,35573989	Adjusted R ² = ,33989743			
REGRESS.	F(3,122)=22,455		p<,00000	Std.Error of estimate: ,14012		
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(122)	p-level
Intercpt			-21,9422	34,04015	-,644599	,520397
H _f	-13,4533	23,37679	-1,0845	1,88453	-,575498	,566015
H ²	6,8718	11,80488	,0121	,02083	,582116	,561563
LOGH	7,2083	11,65056	30,1453	48,72266	,618712	,537260

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	1,322628	3	,440876	22,45484	,000000
Residual	2,395336	122	,019634		
Total	3,717965				

MODELO 3:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
2	AC	8.3	-9999	
5	LOGAC	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,747933080
 Multiple R-Square: ,559403892
 Adjusted R-Square: ,552239728
 Number of cases: 126
 F (2, 123) = 78,08362 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,115403881
 Intercept: -,122938684 Std.Error: ,1064741 t(123) = -1,155 p < ,250478

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	MULTIPLE REGRESS.					
	R= ,74793308	R ² = ,55940389	Adjusted R ² = ,55223973	F(2,123)=78,084	p<,00000	Std.Error of estimate: ,11540
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(123)	p-level
Intercpt			-,122939	,106474	-1,15464	,250478
AC	-,150207	,256942	-,011727	,020059	-,58459	,559892
LOGAC	,893189	,256942	1,021772	,293931	3,47622	,000703

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)						
STAT.	MULTIPLE REGRESS.					
	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level	
Regress.	2,079844	2	1,039922	78,08362	,000000	
Residual	1,638121	123	,013318			
Total	3,717965					

MODELO 4:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
2	AC	8.3	-9999	
3	AC2	8.3	-9999	
5	LOGAC	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,748208109
 Multiple R-Square: ,559815374
 Adjusted R-Square: ,548991162
 Number of cases: 126
 F (3, 122) = 51,71881 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,115821760
 Intercept: -,084671208 Std.Error: ,1557547 t(122) = -,5436 p < ,587696

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	MULTIPLE REGRESS.					
	R=	R ² =	Adjusted R ² =	F(3,122)=	p<	Std.Error of estimate:
	,74820811	,55981537	,54899116	51,719	,00000	,11582
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(122)	p-level
Intercpt			-,084671	,155755	-,543619	,587696
AC	,345993	1,491784	,027012	,116463	,231932	,816979
AC ²	-,259280	,767769	-,001328	,003933	-,337705	,736166
LOGAC	,641843	,787684	,734242	,901078	,814849	,416747

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)						
STAT.	MULTIPLE REGRESS.					
	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level	
Regress.	2,081374	3	,693791	51,71881	,000000	
Residual	1,636591	122	,013415			
Total	3,717965					

MODELO 5:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
6	H _f	8.3	-9999	
11	HXLOGAC	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,844607917
 Multiple R-Square: ,713362533
 Adjusted R-Square: ,708701761
 Number of cases: 126
 F (2, 123) = 153,0567 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,093082184
 Intercept: -,217115183 Std.Error: ,0911728 t(123) = -2,381 p < ,018783

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	MULTIPLE					
REGRESS.	REGRESS.					
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(123)	p-level
Intercept			-,217115	,091173	-2,38136	,018783
H _f	,137652	,060644	,011097	,004889	2,26982	,024960
HXLOGAC	,754153	,060644	,031728	,002551	12,43565	,000000

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)						
STAT.	MULTIPLE					
REGRESS.	REGRESS.					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level	
Regress.	2,652257	2	1,326128	153,0567	,000000	
Residual	1,065708	123	,008664			
Total	3,717965					

MODELO 6:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
11	HXLOGAC	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,837470122
 Multiple R-Square: ,701356206
 Adjusted R-Square: ,698947788
 Number of cases: 126
 F (1, 124) = 291,2104 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,094627757
 Intercept: -,025261494 Std.Error: ,0347465 t(124) = -,7270 p < ,468583

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	Regression Summary for Dependent Variable: V					
MULTIPLE	R= ,83747012	R ² = ,70135621	Adjusted R ² = ,69894779			
REGRESS.	F(1,124)=291,21	p<,00000	Std.Error of estimate: ,09463			
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(124)	p-level
Intercpt			-,025261	,034747	-,72702	,468583
HXLOGAC	,837470	,049076	,035233	,002065	17,06489	,000000

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)						
STAT.	Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)					
MULTIPLE						
REGRESS.						
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level	
Regress.	2,607618	1	2,607618	291,2104	,000000	
Residual	1,110347	124	,008954			
Total	3,717965					

MODELO 7:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
4	\sqrt{AC}	8.3	-9999	
6	H_f	8.3	-9999	
9	$HX\sqrt{AC}$	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,844432877
 Multiple R-Square: ,713066884
 Adjusted R-Square: ,706011152
 Number of cases: 126
 F (3, 122) = 101,0621 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,093511078
 Intercept: -,697541618 Std.Error: ,5816220 t(122) = -1,199 p < ,232734

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	MULTIPLE REGRESS.					
	R=	R ² =	Adjusted R ² =	F(3,122)=	p<	Std.Error of estimate:
	,84443288	,71306688	,70601115	101,06	,00000	,09351
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(122)	p-level
Intercpt			-,697542	,581622	-1,19930	,232734
\sqrt{AC}	,504100	,634110	,202955	,255298	,79497	,428174
H_f	,365618	,321279	,029475	,025900	1,13801	,257347
$HX\sqrt{AC}$,147379	,781767	,002126	,011279	,18852	,850782

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	2,651158	3	,883719	101,0621	,000000
Residual	1,066807	122	,008744		
Total	3,717965				

MODELO 8:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
2	AC	8.3	-9999	
6	H _f	8.3	-9999	
9	HX√AC	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,843718038
 Multiple R-Square: ,711860127
 Adjusted R-Square: ,704774721
 Number of cases: 126
 F (3, 122) = 100,4685 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,093707511
 Intercept: -,186320145 Std.Error: ,1829649 t(122) = -1,018 p < ,310533

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	MULTIPLE REGRESS.					
	R=	R ² =	Adjusted R ² =	F(3,122)=	100,47	p<,000000 Std.Error of estimate: ,09371
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(122)	p-level
Intercpt			-,186320	,182965	-1,01834	,310533
AC	-,121241	,352371	-,009465	,027509	-,34407	,731384
H _f	,051806	,194000	,004176	,015639	,26704	,789888
HX√AC	,915858	,437386	,013214	,006311	2,09393	,038336

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)						
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level	
Regress.	2,646671	3	,882224	100,4685	,000000	
Residual	1,071294	122	,008781			
Total	3,717965					

MODELO 9:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
4	√AC	8.3	-9999	
9	HX√AC	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,842627448
 Multiple R-Square: ,710021017
 Adjusted R-Square: ,705305911
 Number of cases: 126
 F (2, 123) = 150,5843 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,093623171

Intercept: -,037914945 Std.Error: ,0481176 t(123) = -,7880 p < ,432233

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	Regression Summary for Dependent Variable: V					
MULTIPLE	R= ,84262745	R ² = ,71002102	Adjusted R ² = ,70530591			
REGRESS.	F(2,123)=150,58	p<,00000	Std.Error of estimate: ,09362			
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(123)	p-level
Intercpt			-,037915	,048118	-,78796	,432233
√AC	-,203911	,122728	-,082096	,049411	-1,66149	,099163
HX√AC	1,026031	,122728	,014804	,001771	8,36020	,000000

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)					
STAT.	Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)				
MULTIPLE					
REGRESS.					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	2,639833	2	1,319917	150,5843	,000000
Residual	1,078132	123	,008765		
Total	3,717965				

MODELO 10:

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
3	AC ²	8.3	-9999	
7	H ²	8.3	-9999	
10	HXAC	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Variables were entered in one block

Dependent Variable: V
 Multiple R: ,842195655
 Multiple R-Square: ,709293521
 Adjusted R-Square: ,702145001
 Number of cases: 126
 F (3, 122) = 99,22243 p < ,000000
 Standard Error of Estimate: ,094123936
 Intercept: ,004587667 Std.Error: ,0446102 t(122) = ,10284 p < ,918260

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	MULTIPLE					
REGRESS.	REGRESS.					
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(122)	p-level
Intercpt			,004588	,044610	,10284	,918260
AC ²	-,346608	,199148	-,001776	,001020	-1,74046	,084300
H ²	,215003	,076940	,000379	,000136	2,79441	,006040
HXAC	1,022449	,216835	,003271	,000694	4,71534	,000006

Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)						
STAT.	MULTIPLE					
REGRESS.	REGRESS.					
Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level	
Regress.	2,637128	3	,879043	99,22243	,000000	
Residual	1,080836	122	,008859			
Total	3,717965					

ANEXO 3 – RELATÓRIO DE AJUSTE DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO GERADA PELO MÉTODO *STEPWISE*

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

VARIABLE SPECIFICATIONS:

No	Name	Format	MD Code	Long Label
2	AC	8.3	-9999	
3	AC ²	8.3	-9999	
4	√AC	8.3	-9999	
5	LOGAC	8.3	-9999	
6	H _f	8.3	-9999	
7	H ²	8.3	-9999	
8	LOGH	8.3	-9999	
9	HX√AC	8.3	-9999	
10	HXAC	8.3	-9999	
11	HXLOGAC	8.3	-9999	
1	V	8.3	-9999	

Missing data casewise deleted

data file: Variaveis.STA [126 cases with 11 variables]

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Forward stepwise regression, no. of steps: 2

Dependent Variable: V

Multiple R: ,844750909

Multiple R-Square: ,713604099

Adjusted R-Square: ,708947255

Number of cases: 126

F (2, 123) = 153,2377 p < ,000000

Standard Error of Estimate: ,093042953

Intercept: -,223785401 Std.Error: ,0755587 t(123) = -2,962 p < ,003672

no other F to enter exceeds specified limit

Regression Summary for Dependent Variable: V						
STAT.	R=		R ² =		Adjusted R ² =	
MULTIPLE	,84475091		,71360410		,70894725	
REGRESS.	F(2,123)=153,24		p<,00000		Std.Error of estimate: ,09304	
N=126	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(123)	p-level
Intercept			-,223785	,075559	-2,96174	,003672
HX√AC	1,241324	,199304	,017910	,002876	6,22830	,000000
HXAC	-,414912	,199304	-,001327	,000638	-2,08181	,039434

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+						
STAT.	Analysis of Variance; DV: V (variaveis.sta)					
MULTIPLE						
REGRESS.						
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+						
	Sums of		Mean			
Effect	Squares	df	Squares	F	p-level	
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+						
Regress.	2,653155	2	1,326577	153,2377	,000000	
Residual	1,064810	123	,008657			
Total	3,717965					
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+						