

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO  
CAMPUS DE IRATI, PARANÁ**

**DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS A PARTIR DE  
FOTOGRAFIAS TERRESTRES EM FLORESTAS URBANAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**JULIANA APARECIDA MAULONI**

**IRATI – PR  
2012**

**JULIANA APARECIDA MAULONI**

**DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS A PARTIR DE  
FOTOGRAFIAS TERRESTRES EM FLORESTAS URBANAS**

Dissertação apresentada á Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Fotogrametria Terrestre, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho  
Orientador

Prof. Dr. Attilio Antonio Disperati  
Orientador, *in memoriam*

Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado  
Co-Orientador

Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita  
Co-Orientador

**IRATI – PR  
2012**

Catálogo na Fonte  
Biblioteca da UNICENTRO

M451d MAULONI, Juliana Aparecida  
Determinação de variáveis dendrométricas a partir de fotografias terrestres em florestas urbanas / Juliana Aparecida Mauloni– Irati, PR : UNICENTRO, 2012.

62f.  
ISBN

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro - Oeste, PR. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Fotogrametria Terrestre  
Orientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho  
Orientador *in memoriam*: Prof. Dr. Attilio Antonio Disperati  
Coorientador: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado  
Coorientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

1. Engenharia Florestal – dissertação. 2. Floresta Urbana. 3. Imagem – singular. 4. Dendrometria. I. Figueiredo Filho, Afonso. II. Disperati, Attilio Antonio (in memoriam). III. Machado, Álvaro Muriel Lima. IV. Mitishita, Edson Aparecido. V. Título.

CDD 20ª ed. 634.9285



## Universidade Estadual do Centro-Oeste

Reconhecida pelo Decreto Estadual nº 3.444, de 8 de agosto de 1997

### PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

#### PARECER

Defesa Nº 39

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, após arguir a mestranda **Juliana Aparecida Mauloni** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado “Determinação de variáveis dendrométricas a partir de fotografias terrestres em florestas urbanas”, é de parecer favorável à APROVAÇÃO da estudante, habilitando-a ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

Irati-PR, 22 de agosto de 2012.

Dr.ª Christel Lingnau  
Universidade Federal do Paraná  
Primeira Examinadora

Dr. Alvaro Muriel Lima Machado  
Universidade Federal do Paraná  
Segundo Examinador

Dr. Afonso Figueiredo Filho  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Pres. Zacarias 875 – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090 – CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR

Campus CEDETEG: Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 03 – Fone/FAX: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-080 – GUARAPUAVA – PR

Campus de Irati: PR 153 – Km 07 – Riozinho – Cx. Postal. 21 – Fone: (42) 3421-3000 – FAX: (42) 3421-3067 – CEP 84.500-000 – IRATI – PR

A vida é para nós o que concebemos dela. Para o rústico cujo campo lhe é tudo, esse campo é um império. Para o César cujo império lhe ainda é pouco, esse império é um campo. O pobre possui um império; o grande possui um campo. Na verdade, não possuímos mais que as nossas próprias sensações; nelas, pois, que não no que elas vêm, temos que fundamentar a realidade da nossa vida.

**Fernando Pessoa**

## AGRADECIMENTOS

*Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela oportunidade de realização de mais um passo importante em minha vida, por ser minha força, pela fé que tenho.*

*Aos meus pais, Helio Mauloni e Maria do Carmo Bernardino Mauloni, minhas irmãs Luana e Mariana, agradeço pelo amor, pela dedicação, pelo apoio incondicional, sem vocês em nada seria possível.*

*Meus agradecimentos ao Dr. Afonso Figueiredo Filho, certeza que sem seu apoio esse trabalho não sairia, obrigado por ter me ajudado nas horas mais difíceis, e por ter aceitado ser meu orientador, e além de tudo desculpa por algumas faltas que cometi.*

*Aos meus co-orientadores Drs. Álvaro M. L. Machado e Edson A. Mitishita, que teve sua imensa contribuição no início desse trabalho, formando a base para darmos continuidade.*

*Agradeço!*

*Meus eternos agradecimentos ao idealizador desse projeto, Dr. Attilio Antonio Disperati (in memorian). Todo esse trabalho é dedicado ao professor, talvez o professor esperasse mais de mim, mas continuei em memória do professor. Agradeço a Deus por ter conhecido o Dr. Attilio Disperati (in memorian) por todos os conhecimentos repassados, pela dedicação, pela paciência, por ter acreditado em mim. Obrigado!*

*Meus agradecimentos especiais:*

*A todos vocês, muito obrigado!!!*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	ii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. GERAL.....	4
2.2. ESPECIFICOS .....	4
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
3.1. ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS.....	5
3.2. FOTOGRAMETRIA TERRESTRE.....	7
3.3. CÂMARA DIGITAL.....	10
3.4. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS .....	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
4.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
4.2. AMOSTRA.....	17
4.3. MATERIAIS.....	17
4.4. COLETA DE DADOS EM CAMPO.....	18
4.4.1. MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS PROPOSTOS E TESTADOS .....	20
4.4.1.1. Método Escala/Fotografia (Método 1).....	20
4.4.1.2. Método da Mira Topográfica (Método 2).....	25
4.4.1.3. Método de Fotogrametria Terrestre com uma Imagem-Singular (Método 3).....	27
4.4.2. OBSERVAÇÕES DOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	33
4.4.3. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA .....	34
4.4.4. AJUSTE DE EQUAÇÃO DE VOLUME E DE FUNÇÕES DE AFILAMENTO.....	35
4.4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS TESTADOS.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1. DESCRIÇÃO DA AMOSTRA.....	40
5.2. ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS AO LONGO DO TRONCO PARA OS MÉTODOS TESTADOS.....	42

5.2.1. ESTATÍSTICAS BÁSICAS DOS TRATAMENTOS.....	42
5.2.1.1. Avaliação dos métodos considerando-se todos os diâmetros estimados ao longo do tronco.....	43
5.3. ESTIMATIVAS DE ALTURAS AO LONGO DO TRONCO PELOS MÉTODOS TESTADOS.....	47
5.4. EQUAÇÕES DE VOLUME AJUSTADAS .....	49
5.5. FUNÇÕES DE AFILAMENTO AJUSTADAS .....	52
6. CONCLUSÕES .....	55
7. RECOMENDAÇÕES.....	56
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Câmara escura.....	10
Figura 2. Etapas no processamento de imagens.....	13
Figura 3. Localização geográfica da área de estudo.....	16
Figura 4. Marcação com fitas coloridas das alturas para medição dos diâmetros. ....	18
Figura 5. Diâmetros marcados com spray branco em árvore com altura total de 16 m.....	20
Figura 6. Procedimentos realizados em campo (Fase I) e processamentos dos dados (Fase II). 22	
Figura 7. Visão de uma fotografia vertical em terreno plano. ....	22
Figura 8. Visão da tomada da foto.....	23
Figura 9. Imagem tomada a 18 metros de distância. ....	27
Figura 10. Representação de x e y.....	29
Figura 11. Condições de imagem no nadir com fonte aleatoriamente selecionada para gravação de imagem e objeto sistema de coordenadas (imagem positiva). ....	30
Figura 12. Referencial x, y na imagem da árvore.....	34
Figura 13. Diâmetros medidos com a suta em diferentes alturas. ....	41
Figura 14. Distribuição dos resíduos das alturas acumuladas obtidas pelos três métodos em relação às alturas medidas com a estação total.....	49
Figura 15. Dispersão de resíduos (%) dos tratamentos em relação ao volume total estimado pelos di medidos com suta pelo modelo de Schumacher-Hall. ....	52
Figura 16. Distribuição gráfica dos resíduos em percentagem em função de $h_i/h$ para cada método testado e para os diâmetros medidos com a suta. ....	53
Figura 17. Afilamento estimado pela função de $5^\circ$ grau para os métodos testados e para os diâmetros medidos com a suta. ....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição da amostra em classes de DAP e altura total.....	40
Tabela 2. Total de árvores medidas em cada local e respectiva quantidade de diâmetros (di) medidos ao longo do tronco por árvore.....	40
Tabela 3. Principais estatísticas da amostra. ....	41
Tabela 4. Distribuição dos diâmetros (di) da amostra em classes de altura (hi) ao longo do tronco. ....	41
Tabela 5. Média, Variância, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação do diâmetro ao longo do tronco (di), por tratamento.....	42
Tabela 6. Teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.....	43
Tabela 7. Comparação entre os tratamentos com a estatística do teste de Dunn. ....	43
Tabela 8. Análise de variância entre os tratamentos (T1, T2, T3 e T0) para os diâmetros estimados na 1ª porção dos fustes.....	44
Tabela 9. Teste de Tukey para as médias dos 4 tratamentos para os diâmetros estimados para a primeira porção do tronco (até 33,3% da altura total).....	44
Tabela 10. Análise de variância entre os tratamentos (T1, T2, T3 e T0) para os diâmetros estimados na porção mediana dos fustes.....	45
Tabela 11. Teste de Tukey para as médias dos quatro tratamentos para os diâmetros estimados para a segunda porção do tronco (de 33,3% até 66,6% da altura total).....	45
Tabela 12. Análise de variância entre os tratamentos (T1, T2, T3 e T0) para os diâmetros estimados na porção final dos fustes.....	46
Tabela 13. Teste de Tukey para as médias dos quatro tratamentos para os diâmetros estimados para a porção final dos troncos (66,6% até 99,9% da altura total).....	46
Tabela 14. Erro médio em porcentagem para estimar diâmetros (di's) ao longo do tronco e em partes do tronco pelos métodos testados.....	47
Tabela 15. Média, Variância, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação da altura ao longo do tronco.....	47
Tabela 16. Resultados do p-valor e estatística do teste de Kruskal-Wallis. ....	48
Tabela 17. Volume total com casca calculado por Smalian a partir dos diâmetros (di) e alturas (hi) obtidos pelos quatro métodos.....	50

Tabela 18. Coeficientes e estatísticas do modelo de Schumacher-Hall para estimar o volume total com casca por tratamento. ....	50
Tabela 19. Erro Padrão de Estimativa (Syx%) recalculado para os métodos em função dos volumes cubados com a suta.....	51
Tabela 20. Soma do volume da amostra estimada pelo modelo de Schumacher-Hall para os métodos testados e para os diâmetros medidos com a suta e respectivos resíduos médios (%).	51
Tabela 21. Coeficientes estimados e estatísticas para o modelo do 5° grau para cada tratamento. ....	52
Tabela 22. Erro Padrão da Estimativa (Syx%) da função de 5° grau recalculado em relação aos diâmetros medidos com a suta. ....	53

## RESUMO

O trabalho teve como objetivo avaliar o uso da Fotogrametria Terrestre na estimativa de alturas e diâmetros ao longo do tronco em árvores em pé de *Araucaria angustifolia*. Foram selecionadas 50 árvores, localizadas no município de São José dos Pinhais, variando de 12 a 20 metros de altura. Na medição das variáveis dendrométricas (altura e diâmetro) ao longo do tronco, foram utilizadas a Estação total e a Suta. Para observar nas imagens os locais medidos nas árvores, foram demarcados com spray de cor branca estes em forma de faixa. A partir de um tripé e uma câmara digital de 12 Megapixel, as fotos foram tomadas em diferentes distâncias dependendo da altura total da árvore. O tripé foi nivelado ao terreno e as árvores tomadas uma a uma centralizadas na imagem. Após a coleta de dados em campo, as imagens foram selecionadas e submetidas em software na verificação dos pixels. Foram testados três métodos fotogramétricos denominados: Método Escala/Fotografia, Método da Mira Topográfica e o Método Fotogrametria por uma Imagem-Singular. Os diâmetros ao longo do tronco medidos com a suta e estimados pelos três métodos foram estatisticamente comparados. Equações de volume e funções de afilamento foram ajustadas com os diâmetros obtidos pela suta e pelos métodos testados a fim de verificar a viabilidade das determinações realizadas com os métodos fotogramétricos propostos. Os resultados apontaram que apenas os diâmetros medidos pelo Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular, foram estatisticamente iguais aos diâmetros medidos com a suta. Por outro lado, não houve diferenças significativas entre os tratamentos quanto à variável altura, mostrando que os métodos são iguais entre si. A equação de volume e a função de afilamento ajustadas com os diâmetros gerados pelo Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular tiveram desempenhos similares às equações ajustadas com os dados dos diâmetros medidos com a suta. Concluiu-se que o método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular apresentou resultados bastante promissores para a cubagem de árvores em pé.

**Palavras-chave:** Floresta urbana, imagem-singular, fotografias de pequeno formato.

## ABSTRACT

The study aimed to evaluate the use of Terrestrial Photogrammetry in estimating heights and diameters along the stem in standing trees of *Araucaria angustifolia*. Were selected 50 trees, located in São José dos Pinhais, ranging height from 12 to 20 meter. In measuring the dendrometric variables (height and diameter) along the stem, we used the total station and tree caliper. To observe the images locations measured in the trees were marked with white along the stem. From a tripod and a 12 Megapixel digital camera, the photos were taken at different distances depending on the total height. The tripod was leveled to the ground and the trees taken one by one centered in the image. After collecting data in the field, the images were selected and submitted for verification of software in pixels. Three different terrestrial photogrammetry methods called: Scale / Photography, Mira Topographic and Single-image Photogrammetry. The diameters along the stem measured with calipers and estimated by the three methods were statistically compared. Volume equations and taper functions were fitted to the diameters obtained by caliper and by tested methods to verify the feasibility of the determinations performed with the photogrammetric methods proposed. The results showed that only the diameters measured by Single-image Photogrammetry were statistically identical to the diameters measured with tree caliper. Moreover, no significant differences between treatments for the variable height, showing that the methods are equals. The volume equation and taper function adjusted with diameters generated by Single-image Photogrammetry method had similar performance to the equations fitted to the data of diameters measured with calipers. It was concluded that the Single-image Photogrammetry method showed promising results for the scaling of standing trees in urban forestry.

**Keywords:** Urban forestry, single-image, small-format image.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor florestal proporciona benefícios para a sociedade visando a sustentabilidade dos bens oriundos da floresta, por meio do manejo florestal. O gerenciamento dos recursos florestais, tanto do ponto de vista econômico quanto da conservação, requer o conhecimento de dados coletados como diâmetro e altura das árvores, densidade e volume do talhão, entre outras. As duas variáveis dendrométricas mais utilizadas nos inventários florestais são diâmetro e altura, usadas para o cálculo da área basal e do volume de madeira existentes em uma floresta (FREITAS e WICHERT, 1998).

O volume de árvores em pé é estimado a partir do diâmetro e da altura, em geral de três maneiras: usando fator de forma, equações de volume ou funções de afilamento. Para desenvolver essas ferramentas é necessário determinar volumes acurados, ou seja, volumes ditos reais. Os volumes reais podem ser obtidos pelo deslocamento da água (Princípio de Arquimedes ou utilizando-se um Xilômetro). Estimativas acuradas do volume real podem ser obtidas pelo peso, graficamente e por meio de fórmulas que estabelecem na árvore diferentes formas geométricas, tendo como as mais tradicionais no setor florestal as fórmulas de Smalian, Huber e Newton, denominadas de métodos analíticos.

Os métodos de pesagem, deslocamento de água e por gráficos são difíceis de aplicar e, desta forma, os mais utilizados são os métodos analíticos, os quais envolvem medições de diâmetros em diferentes alturas ao longo do tronco, a partir de uma amostra representativa da população (em geral, no mínimo 30 árvores). Este processo é denominado de cubagem na área florestal e a amostra é utilizada para desenvolver fatores de forma médios, equações de volume ou de afilamento. A partir dessas ferramentas, finalmente, os volumes das árvores em pé podem ser estimados com a medição em campo de apenas o diâmetro e a altura.

Segundo Spurr (1952), três fatores determinam a escolha das medidas a serem realizadas nas árvores: a facilidade e a velocidade que as medidas podem ser realizadas; a exatidão com que podem ser feitas e a correlação entre as medidas e as características às quais se desejam as estimativas.

Na cubagem de árvores, os diâmetros ou circunferências ao longo do tronco são obtidos, em geral, de forma direta, derrubando-se as árvores ou então escalando-as. Medidas indiretas podem ser realizadas com o emprego de dendrômetros específicos para este fim, como o

Pentaprisma de Wheeler, o telerelascópio, dentre outros. Estes instrumentos medem as alturas e os respectivos diâmetros à distância. Todavia, as medições costumam ser demoradas e não muito acuradas no interior da copa, onde os diâmetros são de difíceis definições.

Outras técnicas de medição de diâmetro em árvores em pé já foram estudadas e observadas ao longo dos anos, como a tecnologia do laser scanner terrestre. Segundo Lingnau et al. (2007), a tecnologia laser scanner terrestre apresenta potencial promissor para uso na área florestal para subsídio nas diversas formas de planejamento (planejamento de inventários florestais, do manejo florestal, produção florestal, de estradas e da colheita florestal, entre outros), bem como para obtenção de variáveis dendrométricas, tais como, altura, DAP, volume, fator de forma, qualidade do fuste, qualidade da madeira, etc. Também foi testado e apresentado por Andrade (2001) o uso da metodologia da fotogrametria analítica em projetos florestais. Os processos apresentados foram sofisticados e obtiveram resultados de precisão da ordem de 1% em relação ao volume calculado pela cubagem.

A obtenção das variáveis dendrométricas em campo consome tempo e recursos e muitas vezes, tornam-se inviáveis pelas dificuldades de acesso. Deste modo, a utilização da Fotogrametria na Ciência Florestal visa proporcionar ao setor a aplicabilidade de uma técnica de mensuração que pode ser simples e confiável, configurando-se como uma opção a mais na mensuração florestal.

Com as melhoras significativas na modelagem matemática com o uso de imagens digitais, os resultados obtidos em medições florestais têm sido satisfatórios e inclusive já foram enumeradas algumas vantagens para este tipo de coleta de dados por Clark et al. (1998).

- A precisão é tão boa ou melhor do que qualquer dendrômetro óptico disponível;
- A imagem terrestre requer muito menos tempo para contemplar centenas de vezes mais dados, ou seja, cada imagem contém uma grande quantidade de diâmetros e alturas;
- As imagens das árvores são adquiridas em uma época no tempo, mas as medições podem ser realizadas repetidas vezes e para diversos fins;
- A garantia de qualidade pode ser mais simples, pois as operações em campo são menos necessárias.

Embora existam várias aplicações na literatura internacional abordando a Fotogrametria Terrestre no setor florestal, principalmente europeia, essa tecnologia, ainda pode ser considerada um desafio quanto à sua aplicação no setor florestal brasileiro.

A utilização da técnica baseia-se, a princípio, na tomada das fotografias, em função da posição da câmara, dependendo somente das características da câmara fotográfica utilizada e em alguns casos podendo ocorrer interferência dos efeitos atmosféricos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. GERAL**

O trabalho teve como objetivo avaliar o uso de métodos expeditos da Fotogrametria Terrestre para estimar alturas e diâmetros ao longo do tronco em árvores em pé de *Araucaria angustifolia*.

### **2.2. ESPECIFICOS**

- ✓ Desenvolver uma metodologia com base em fotos singulares para medições de altura e diâmetro ao longo do tronco.
- ✓ Comparar os diâmetros estimados pelas fotos singulares com as medições realizadas pelo método tradicional (suta).
- ✓ Comparar as alturas estimadas pelas fotos singulares com as medições realizadas com equipamento topográfico (estação total).
- ✓ Ajustar equações de volume e afilamento com os dados obtidos pelos métodos testados;
- ✓ Comparar os volumes estimados com equação de volume e de afilamento ajustadas com os diâmetros medidos pelos diversos métodos empregados na pesquisa.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS

Inventário florestal é uma atividade que visa obter informações qualitativas e quantitativas dos recursos florestais existentes em uma área pré-especificada (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1997). Em geral, os inventários florestais são realizados por amostragem, utilizando unidades de amostras (amostra), nas quais são medidos todos os DAP e a altura das árvores. Muitas vezes a alternativa empregada para minimizar os custos de medição das alturas é utilizar uma relação hipsométrica.

Dispondo-se de tal amostra cujo tamanho depende da variabilidade da floresta, da precisão desejada das estimativas e dos recursos financeiros disponíveis, pode se estimar o volume por meio da obtenção de fatores de forma representativos, ajustes de equação de volume ou de funções de afilamento.

Para se estimar o volume de madeira de uma árvore em pé é necessário medir o seu diâmetro e a sua altura. O diâmetro é medido a 1,30 m de altura do solo e por isso é chamado “Diâmetro à Altura do Peito” – DAP. Existem vários instrumentos para se medir o DAP sendo o mais comum a suta ou compasso florestal. Entretanto, o DAP pode ser facilmente obtido usando-se uma fita métrica ou uma trena (COUTO et al., 1989). A partir destas medições, os volumes são estimados com técnicas indiretas, tais como: fator de forma, equações de volume e funções de afilamento (taper functions) (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006).

Os procedimentos mais comuns utilizados na estimativa de volumes por árvores é o emprego de equações em que o volume constitui a variável dependente, estando às variáveis independentes comumente representadas pelo diâmetro à altura de peito (DAP com casca) e à altura total ( $H$ ) ou altura comercial (MACHADO et al., 2002).

Uma terceira variável independente que eventualmente pode ser usada em equações volumétricas é um termo que expressa a forma do fuste, normalmente o quociente de forma (MACHADO et al., 2002).

A vantagem das equações de volume é o cálculo de volume sólido, árvore a árvore, com modelos matemáticos, especialmente testados para apresentar os menores erros possíveis

(COUTO e BASTOS, 1987). As equações mais difundidas e utilizadas no setor florestal brasileiro são as equações de Schumacher-Hall, Spurr e Husch-Berkhout.

Campos e Leite (2009) citaram que o modelo de Schumacher e Hall têm sido o mais difundido, talvez por suas propriedades estatísticas, uma vez que resulta quase sempre em estimativas não-tendenciosas. Estes mesmos autores citaram que a difusão do modelo de Spurr (1952) deve ser atribuída mais à facilidade do ajustamento, pois, com frequência, volumes de árvores menores são estimados com imprecisão.

De acordo com Ahrens e Holbert (1981), uma função de afilamento é uma descrição matemática do perfil longitudinal de um tronco. Assumindo-se que a seção transversal seja circular em qualquer ponto ao longo do tronco, seu volume pode ser obtido por integração daquela função. Assim em termos geométricos, o tronco é tratado como um sólido de revolução. Uma vez definido um modelo matemático para o afilamento, pode-se determinar o volume de madeira entre quaisquer pontos ao longo do tronco. Desta maneira a natureza do algoritmo viabiliza a obtenção das estimativas de volume necessárias à multiplicidade de usos da madeira.

Caso não se disponha de fatores de forma, equações de volume ou de funções de afilamento para estimar o volume das árvores medidas nas parcelas, torna-se necessário a cubagem de uma amostra representativa de árvores, com as quais se podem desenvolver uma das três alternativas mencionadas. A cubagem consiste na medição de diâmetros a diferentes alturas do tronco da amostra de árvores e tal medição, em geral, é feita sobre árvores derrubadas, escalando as árvores ou então utilizando instrumentos capazes de medir diâmetros à distância, além do uso de tecnologias mais recentes advindas da geotecnologia.

Tendo-se coletado a amostra de árvores, o volume real das árvores pode ser obtido a partir de três formas (SCOLFORO e FIGUEIREDO FILHO, 1998): Deslocamento de água, Peso e Cubagem rigorosa.

Há vários métodos de obtenção do volume dos fustes das árvores, entretanto, o método de cubagem pelo deslocamento de água (Princípio de Arquimedes ou utilizando-se um Xilômetro) é o único que fornece o valor paramétrico do volume, ou seja, o volume verdadeiro. Os demais métodos de cubagem conhecidos e muito aplicados resultam do uso de expressões matemáticas que estimam com certa acuracidade o valor paramétrico do volume do fuste da árvore ou parte dele (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006).

A cubagem possibilita a obtenção do volume sólido do tronco, que associado às variáveis dendrométricas, diâmetro e altura, permite gerar modelos de equações para descrever estes volumes, que podem, também, ser apresentados em forma de tabelas (FINGER, 1992). São feitas por meio de fórmulas matemáticas, baseadas nos sólidos geométricos de revolução. As três fórmulas de cubagem mais conhecidas para a determinação de volumes individuais são as de Huber, Smalian e Newton, denominados de métodos analíticos, mas muitos outros e mais recentes (Centróide, Deslocamento de Seções, etc) são citados na literatura (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006). Além desses métodos analíticos, as estimativas acuradas do volume dito real também podem ser obtidas pelo método de pesagem e pelo método gráfico.

GOMES (1959), citado por PATON (1984), mencionou que para a cubagem rigorosa de uma árvore é necessário a medição de diâmetros em forma sucessiva ao longo do fuste da árvore, e os comprimentos correspondentes. Os volumes são obtidos para cada seção por fórmulas conhecidas, e o volume do tronco é obtido pela somatória dos volumes das seções, e assim têm-se volumes calculados com grande acuracidade.

### **3.2. FOTOGRAMETRIA TERRESTRE**

A Fotogrametria está ligada aos avanços da ciência. Teve início com a descoberta da fotografia em 1839 por ARAGO, aperfeiçoado por NIEPCE e DAGUERRE (SOBRINO, 2007).

Em 1849 sob o comando do Coronel Aimé Laussedat do Corpo de Engenheiros do exército francês, geodesta da Academia Francesa, foi demonstrado que o uso de fotografias era viável no mapeamento topográfico. Durante vários anos o Coronel Laussedat investiu seu conhecimento e sua persistência para o desenvolvimento da prática da fotogrametria aérea, com o uso de balões para a tomada das fotografias. Porém, devido às dificuldades encontradas para obter fotografias aéreas, seus estudos partiram para a prática da Fotogrametria Terrestre. Já em 1859 o Coronel Laussedat apresentou os resultados de seu trabalho e por isto, é considerado o Pai da Fotogrametria (SANTOS, 2010).

A tarefa fundamental da Fotogrametria é o estabelecimento rigoroso da relação geométrica existente entre o objeto e a sua imagem, tal qual no momento da tomada da

imagem. Obtido este relacionamento, de forma correta, pode-se então extrair informações sobre o objeto, usando-se para isto tão somente o conjunto de imagens (MACHADO, 2006).

A Fotogrametria Terrestre utiliza fotos com as câmaras fixas ao chão, a pouca distância do local, tornando as reconstituições mais rápidas. Este tipo de levantamento possui uma precisão significativa (ALVAREZ et al., 2003).

No método terrestre, a aquisição de imagens fotogramétricas se dá por meio de fototeodolitos ou de câmaras métricas ou não-métricas montadas em tripés bem fixados. A utilização da câmara métrica, nesse caso, visa a uma maior rigidez nas coordenadas de câmara, além de contar com parâmetros já definidos em um certificado de calibração. Entretanto, dado o fato de, em quase todos os casos, os levantamentos terrestres serem realizados a partir de estações estáticas (em relação à Terra), os efeitos danosos que podem vir a ocorrer com o deslocamento da plataforma onde se instala a câmara são completamente eliminados. Devido a estas restrições, a utilização de câmaras não-métricas passou a ganhar grande importância, uma vez que estas são muito mais baratas e práticas. Inúmeras pesquisas foram estabelecidas nessa área, levando a procedimentos seguros de calibração (BRITO e COELHO, 2007). Segundo Cooper e Robson (1996), esta técnica tem enfoque na reconstrução de superfícies de objetos cuja distância entre ele e a câmara seja inferior a 100 metros.

A fotografia é obtida de um ponto na superfície, o qual pode ser de coordenadas conhecidas e também ter a orientação da visada, neste caso utilizando a leitura horizontal de teodolitos. Estes conhecimentos exteriores aos parâmetros obtidos da câmara são os pontos de controle para as fotos terrestres (LOCH e LAPOLLI, 1998).

Segundo Loch (1998), a Fotogrametria Terrestre é usada na análise detalhada de fachada de prédios para recuperação das estruturas ou para trabalhos de arquitetura, em mapeamentos topográficos no auxílio de trabalhos em campo com imagem do local, aplicações na evolução de escavações ou exploração de minas ou reservas e em outras aplicações tais como na agricultura, área florestal, ecologia, arqueologia e oceanografia.

A utilização da Fotogrametria Terrestre tem sido amplamente praticada por muitos anos em vários países europeus, como um meio confiável de investigação de acidentes de trânsito. Fotos que fornecem todas as informações necessárias para reconstruir o acidente podem ser rapidamente obtidas. As fotos terrestres ainda podem ser usadas para constatar recordes de

velocidade de automóveis, na análise da direção e velocidade das correntes de água, taxa e forma de crescimento das plantas, etc. (WOLF, 1983).

Além dessas aplicações, pode-se citar a Bioestereometria ou a Fotogrametria Médica, utilizada para extrair medidas da forma e dimensões do corpo humano. Uma série de vantagens pode ser enumerada, como a ausência de contato com o paciente e o uso de luz visível, evitando radiação, quando se utilizam os processos convencionais (TOMMASELLI, et al., 1999).

A Fotogrametria Terrestre vem sendo citada e mencionada sobre sua importância há séculos atrás, visto como uma técnica que pode ser utilizada de forma eficiente em diversas áreas.

Na área florestal, as aplicações da Fotogrametria Terrestre centraram-se na obtenção de diâmetros superiores e na variável altura das árvores, mostrando que os profissionais estão constantemente buscando outras formas de coleta de dados que sejam eficientes e possíveis.

Bertola (2002) utilizou a técnica na quantificação de volume sólido de madeira empilhada e obteve como resultado a média dos desvios percentuais entre os fatores de empilhamento pelas fotografias e os fatores reais, na ordem de -0,424%.

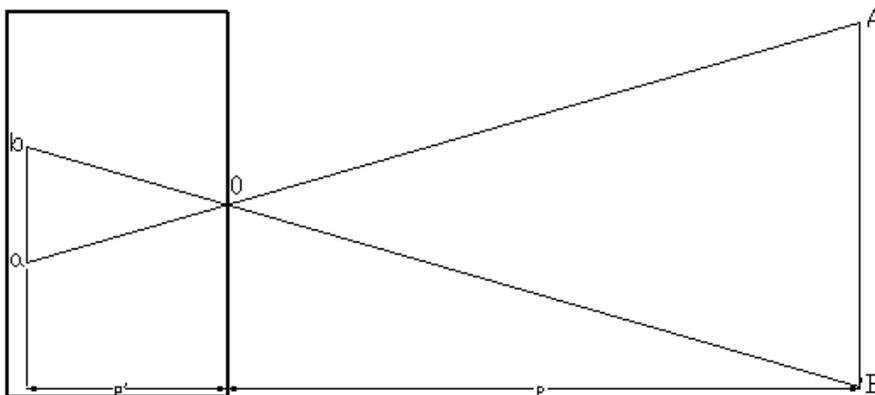
A tecnologia da Fotogrametria foi introduzida na área florestal em 1800, especialmente com o desenvolvimento do processamento eletrônico de dados, bem como a produção de alta qualidade de câmaras amadoras. Um dos pioneiros a aplicar a Fotogrametria no setor florestal, utilizando uma câmara de placa, na qual, as placas foram ajustadas paralelamente ao tronco, foi Weber em 1902 (GAFFREY et al., 2001). No Brasil, a Fotogrametria Terrestre no setor florestal tem sido pouco utilizada e pesquisada, tendo sido divulgado na literatura somente um estudo contemplando o processamento fotogramétrico, utilizando-se o processamento de variáveis dendrométricas. O referido estudo foi desenvolvido por Andrade (2001) na área de Fotogrametria Terrestre sobre calibração e mensurações dendrométricas com câmaras digitais. A autora encontrou um erro padrão na calibração de 11,299 pixels, correspondente a 0,169 mm. 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. A distância de tomada das imagens foi em torno de 55 m.

### 3.3. CÂMARA DIGITAL

A câmara consiste em um dos principais dispositivos na Fotogrametria, pois, com seu uso obtêm-se imagens, das quais se originam os produtos fotogramétricos (WOLF e DEWITT, 2000).

As câmaras digitais convencionais são classificadas como: de pequeno e médio formato, para amadores e profissionais e podem ser classificadas quanto à qualidade geométrica em métricas e não-métricas. São produzidas com tamanhos diferentes e sensores de resoluções diferentes. Tamanho do sensor pode ser definido como a dimensão da largura e altura do conjunto de sensores em milímetros ou polegadas (AHMAD, 2006).

As câmaras fotogramétricas têm por finalidade prover imagens fotográficas com estabilidade geométrica, tornando possível o processo de calibração, ou seja, determinação dos parâmetros geométricos que relaciona dimensões do objeto fotografado com a sua imagem fotográfica (ANDRADE, 1998). Essas câmaras baseiam-se no princípio da câmara escura (Figura 1).



**Figura 1.** Câmara escura.

Pela Figura 1, supondo-se que no lugar da lente tenha-se um pequeno furo circular de projeção central  $O$  a luz reflete no  $\overline{AB}$  e penetra na câmara pelo orifício  $O$  e atinge a parede posterior, que por ser branca, pode refletir qualquer onda do espectro luminoso<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Espectro Luminoso - O espectro luminoso é um comprimento de luz perceptível com uma frequência de cores diferentes, como violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. Corresponde a uma faixa do Espectro Eletromagnético visível ao ser humano.

As câmaras de pequeno formato, em geral, têm a capacidade de focalizar objetos situados a qualquer distância, tendo, por isso, a sua distância principal variável segundo a equação (1):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p'} + \frac{1}{p} \quad (1)$$

Onde:

f = distância focal

p' = distância principal (distância do centro de perspectiva ao plano focal)

p = distância entre o objeto e o centro de perspectiva

Algumas câmaras de pequeno formato permitem “zoom”, o que significa uma variação ainda maior da distância principal. Tais variações são necessárias para colocar em foco as imagens de objetos que se desejam fotografar e, ao mesmo tempo, no caso do “zoom”, ajustar a escala da imagem para adequar aos fins desejados. Contudo, estas facilidades acarretam alterações das propriedades geométricas das câmaras. Quando o objeto está suficientemente distante da objetiva para que a distância focal coincida com a distância principal, basta ter a câmara calibrada para o infinito. Nos demais casos, a câmara deverá estar calibrada para as condições de uso (ANDRADE, 2005).

Segundo Mitishita e Machado (2006), a câmara digital não métrica tem encontrado um maior campo de aplicação nos procedimentos fotogramétricos, tendo em vista a resolução do sensor, facilidades de aquisição a menor custo, fornecendo também soluções confiáveis, quando conhecidos os parâmetros de calibração que determinam a geometria interna da mesma.

As câmaras não-métricas vêm sendo utilizadas com mais freqüência na Fotogrametria devido aos custos elevados da câmara métrica, que a torna inviável em muitos casos. Experimentos realizados por Habib e Morgan (2003) e Machado et al. (2002) mostraram que as instabilidades dos parâmetros de orientação interior de uma câmara não métrica necessariamente não afetam os resultados e uma vez calibradas, podem proporcionar informações significativamente confiáveis.

O surgimento da tecnologia de câmaras fotográficas contribuiu no aperfeiçoamento na obtenção de vários tipos de imagens, isto é, algumas são multiespectrais e conseqüentemente ocasionaram a eliminação do processo de escaneamento de filmes.

Nas câmaras digitais, no lugar do filme, as imagens são capturadas por uma matriz de sensores - CCD (Charged Couple Device) - que detectam energia luminosa e transformam em tensão elétrica proporcional.

Segundo Warner e Slaattelid (1997) e Pitt et al. (1997) existem três atrativos quando se trabalha com câmaras 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 câmara pode ser usada com segurança para fins fotogramétricos quando provida de rotinas de calibração.

Umas das características mais exigidas da câmara digital é a resolução do sensor, medida em megapixels, sendo quanto maior a quantidade de megapixels, resolução espacial melhor gerada uma vez que seu tamanho será maior e conseqüentemente permite mais “zoom” e ampliação da imagem sem perda de qualidade. A resolução espacial depende do tamanho do *pixel* que é dada pela quantidade de *pixels* em uma polegada ou pontos por polegada ou dpi's (dots per inch). Além dessa característica, há outros fatores que influenciam na qualidade da imagem: qualidade das lentes, algoritmo (software interno da câmara que processa os dados capturados) e os recursos que o observador pode usar para um melhor resultado. A resolução de sensores desdobra-se em três diferentes e independentes parâmetros: resolução espacial, resolução espectral e resolução radiométrica.

Outra característica importante da câmara é a distância focal da lente. A imagem fotográfica é um registro instantâneo dos detalhes de um terreno que se determina principalmente pela distância focal da lente da câmara.

### **3.4. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

O tema processamento digital de imagens compreende o conjunto de técnicas que tem por finalidade a extração de informações de imagens digitais. Nessa área, podem ser enquadrados os métodos de aquisição, realce (ou pré-processamento), segmentação, pós-processamento, extração de atributos e classificação (BRITO e COELHO, 2007). Em

processamento de imagens usa-se o modelo matricial e a computação gráfica que geralmente se baseia no modelo de objetos vetoriais.

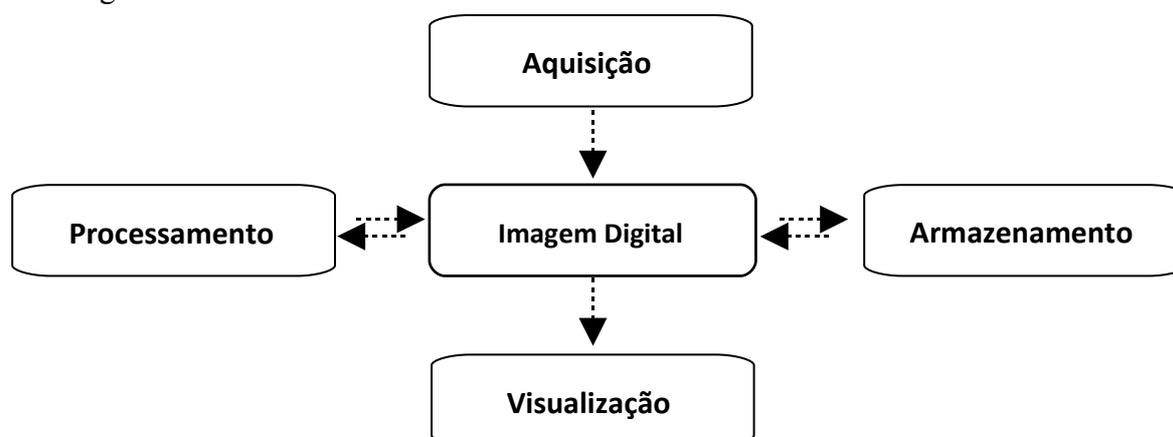
A imagem fotográfica é uma perspectiva central do objeto imageado e só fornece um lugar para a situação dos pontos do objeto fotografado. Permite, em geral, uma reconstrução do objeto mostrado apenas quando pode ser considerada como plana (LEHMANN e BERNARDO, 1975).

De forma geral, uma imagem digital pode ser definida por uma matriz composta por células quadradas chamadas pixels (*picture elements*) tendo por valor de cada um dos elementos o número digital equivalente ou em outras palavras segundo Gonzalez e Woods (2000), uma imagem digital monocromática ou simplesmente a imagem pode ser definida como uma função bidimensional de intensidade da luz  $f(u, v)$ , na qual  $u$  e  $v$  são coordenadas espaciais e o valor de  $f$  em qualquer ponto  $(u, v)$  é proporcional ao brilho (nível de cinza) da imagem naquele ponto.

As imagens são processadas no intuito de melhorar a qualidade de visualização para análise interpretativa humana ou até mesmo de computadores, utilizando operações matemáticas que alterem os valores de pixels.

A área de processamento de imagens se refere à manipulação destes pixels visando a melhoria na apresentação da imagem, o realce ou eliminação de certas características e a extração de informações (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Na Figura 2, podem-se observar os elementos de um sistema de processamento de imagens de uso genérico, as quais abrangem as principais etapas que se pode efetuar sobre uma imagem.



**Figura 2.** Etapas no processamento de imagens.

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 (câmara digital) (HUMMES, 2002).

O processamento de imagens digitais envolve procedimentos normalmente expressos sob forma algorítmica, com o objetivo de melhorar a imagem, aumentando dessa forma os resultados favoráveis nas etapas seguintes. Como exemplos de métodos e algoritmos têm-se a remoção de ruídos, o aumento ou a diminuição do contraste, a suavização em tons de cinza em caso de imagem colorida, o isolamento de regiões conforme o interesse entre outros. Em função disto, com exceção das etapas de aquisição e exibição, a maioria das funções de processamento de imagens pode ser implementada via software.

Segundo Marques Filho e Vieira Neto (1999) *apud* Santos (2008), a etapa de armazenamento pode ser dividida em três categorias:

- a) armazenamento de curta duração de uma imagem (memória RAM), enquanto ela é utilizada nas várias etapas do processamento;
- b) armazenamento de massa para operações de recuperação de imagens relativamente rápidas;
- c) arquivamento de imagens, para recuperação futura quando isto se fizer necessário.

Existem diferentes formatos de arquivos para o armazenamento de imagens, tais como, GIF, TIFF, JPEG, BMP entre outros e o armazenamento é medido em bytes.

Os fatores que afetam as imagens digitais podem ser divididos em dois grupos:

- a) Influenciados pela ação humana;
- b) Influenciados pela natureza.

A interferência humana se mostra pela distância focal da lente, distância tomada no momento da foto ou também na altura do vôo, combinação de filmes, filtros e ângulos da lente. Já quanto aos fatores que são influenciados pela natureza pode-se citar a posição do objeto em relação ao ângulo de incidência do sol, bruma atmosférica, entre outros.

De acordo Brito e Coelho (2007) os problemas que afetam a aquisição de imagens são:

- Aberrações geométricas: Podem ocorrer diferentes tipos de aberrações dependendo do formato das lentes que compõem o sistema da câmara.
- Aberração cromática: Esse tipo de efeito advém do fato de a luz se decompor em diversos comprimentos de onda ao passar por um sistema de lentes, de modo semelhante a um prisma. A distribuição dessa aberração independe da abertura

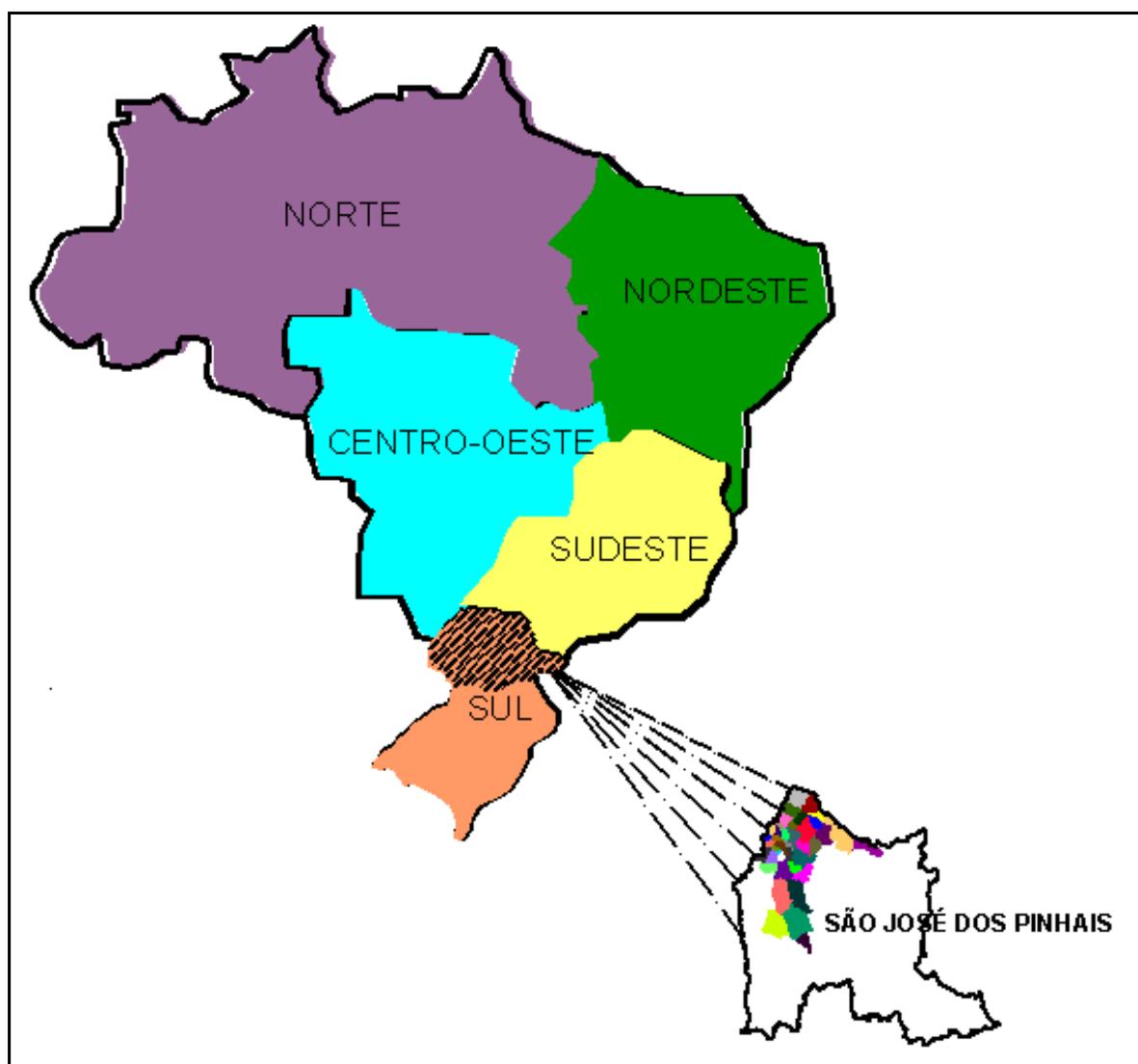
do diafragma e é razoavelmente constante para todas as áreas do plano-imagem. A correção para esse problema se dá com a combinação de duas lentes de convergências opostas e índices de refração diferentes (ANDRADE, 1998).

- Distribuição de luz no plano focal: A principal consequência é o escurecimento dos cantos da imagem. Hoje, com os filtros especiais, esse efeito é quase completamente eliminado.
- Arrastamento de imagem: Durante o tempo de exposição, o movimento da plataforma (sensor) pode provocar esse efeito, que se caracteriza por uma perda de nitidez na imagem final.
- Efeitos atmosféricos: Depende da variação dia a dia. Em dias ensolarados pode causar no caso de fotogrametria aérea sombras muito compridas em determinados horários; Dias com alta umidade causa o efeito chamado *hot spot*, que diminui o contraste da imagem final; Dias com névoa atmosférica deixa a imagem fotogramétrica azulada.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange o território municipal de São José dos Pinhais, Região Metropolitana de Curitiba (Figura 3). Localiza-se a 25°32'05" de latitude sul e a 49°12'23" de longitude oeste, com altitude de 906 metros. O relevo do município é formado pelo talvegue do Iguaçu a oeste e pela serra do Mar a leste.



**Figura 3.** Localização geográfica da área de estudo.

O município de São José dos Pinhais está localizado entre o Primeiro Planalto Paranaense e a Serra do Mar e segundo a classificação de Köppen, o município possui clima

do tipo Cfb, definido como clima temperado (ou subtropical) úmido, mesotérmico, sem estação seca, com verões frescos, e invernos com geadas frequentes e ocasionais precipitações de neve. As médias de temperatura são de 21°C. Parte integrante do primeiro planalto possui uma altitude média de 900 m, porém, existem diferenças de altitudes na região que variam de 300 a 1200 m, caracterizado por topografia suavemente ondulada, com colinas de topos amplos de altitudes uniformes.

## **4.2. AMOSTRA**

A espécie foco do estudo foi a *Araucaria angustifolia*, vulgarmente conhecida como araucária ou simplesmente pinheiro, a qual, segundo MAACK (1968) é a árvore dominante desta região, caracterizando a paisagem, motivo pelo qual se tornou símbolo do Estado do Paraná.

A amostra para a realização da pesquisa se constituiu em 50 árvores isoladas de araucária selecionadas em áreas urbanas e rurais. As árvores foram medidas em sua maioria em propriedades particulares, em terrenos planos sem declividades acentuadas, em áreas rurais e urbanas do município.

## **4.3. MATERIAIS**

Os materiais utilizados na aplicação da metodologia são compostos por equipamentos e softwares, conforme descrito a seguir:

- a) Câmara:
  - CANON SX200 IS;
  - Área da Matriz CCD: sensor de 35 mm; 3000 x 4000 pixels;
- b) Notebook
- c) Software Estatístico Minitab 16 - Versão de avaliação completa por 30 dias;
- d) Aplicativo Excel 2007;
- e) Corel DRAW X3 - Pacote de ferramentas em design gráfico que permite realizar ilustração vetorial, layout de projeto e edição de imagem;
- f) Trena de 50 metros;

- g) Tripé para fixação da câmara fotográfica;
- h) Mira topográfica de 4 metros;
- i) Spray de cor branca;
- j) Hipsômetro Blume-Leiss;
- k) Suta
- l) Estação total LEICA TC 407.

#### 4.4. COLETA DE DADOS EM CAMPO

Nos primeiros testes foram usadas fitas de cor para demarcar os locais de medição do diâmetro (Figura 4), porém a metodologia foi considerada como inviável, pois era difícil o manuseio da fita na amarração pelo tronco. Deste modo, foi utilizado tinta spray de cor branca para demarcar os locais onde foram medidos os diâmetros ao longo do tronco.



**Figura 4.** Marcação com fitas coloridas das alturas para medição dos diâmetros.

Na fase de teste da metodologia, as árvores foram selecionadas em locais com relevo plano e de fácil acesso, em sua maioria em chácaras. As árvores foram escaladas com profissional habilitado com os devidos equipamentos obrigatórios de segurança.

Com tinta spray de cor branca foram demarcados, aleatoriamente, em diferentes alturas, os pontos onde os diâmetros seriam medidos. Para a medição do diâmetro utilizou-se uma suta de 50 cm e com a estação total foi determinada a altura em que foi medido o diâmetro. A altura total da árvore foi medida com o hipsômetro de Blume-Leiss. Na Figura 5, podem-se observar as demarcações feitas ao longo do tronco em uma araucária de 16 metros de altura total.

No momento do uso da estação total na determinação das diferentes alturas, a árvore selecionada para medição tinha que ficar alinhada com o equipamento eletrônico, ou seja, paralela a estação total, de modo a selecionar o lado de visualização mais retilínea, pois a estação total percorre a árvore até seu topo localizando os pontos marcados, e uma vez que a árvore não esteja paralela com a estação total, fica mais difícil verificar os pontos para determinação das alturas. A distância tomada entre observador e árvore é um critério de extrema importância, visto que pode influenciar no erro aleatório, conforme citado em Gaffrey et al. (2001) e levando em conta os testes realizados em campo, a distância entre a árvore e o observador na coleta dos dados deve ser no mínimo a mesma que a altura total da árvore. Foram testados para cada árvore diferentes distâncias no momento da tomada das fotos, partindo-se da altura da árvore como distância mínima e depois selecionadas mais duas distâncias de 5 em 5 metros. No entanto, para árvores com alturas maiores que 15 metros foram utilizadas distâncias máximas de 15 metros para a tomada da foto.



**Figura 5.** Diâmetros marcados com spray branco em árvore com altura total de 16 m.

As imagens foram tomadas à diferentes distâncias e selecionadas aquelas onde os pontos marcados aparecem com a melhor visualização. Ocorreram que, as melhores imagens, foram aquelas tomadas em distâncias menores, ou seja, as fotos em que a distância foi de 8 a 12 metros que seriam equivalentes as alturas das árvores, mas em sua maioria as fotos foram tomadas à distância de 15 metros, visto que a média da altura das árvore foi de 15 metros. A distância entre a árvore e a estação total foi a mesma selecionada para a tomada da foto.

No momento da tomada faz fotos foram anotadas as informações referentes à distância da árvore fotografada e as condições climáticas (dias ensolarados ou nublados).

Todas as fotografias da árvore foram tomadas com a câmara fotográfica em posição inclinada, fixada no tripé e com a imagem da árvore, a ser medida, posicionada no centro da

fotografia. A tomada da imagem foi feita com uma câmara CANON SX200 IS, de 12 Megapixel (3000 x 4000 pixel), com tamanho de sensor de 4,62 mm x 6,16 mm, e tamanho de pixel igual a 0,00154 mm.

Antes mesmo dos procedimentos em campo, foi realizado a calibração da câmara, para garantir um sistema de mensuração de elevada confiabilidade. A calibração da câmara foi indispensável devido à aplicação do primeiro método testado na pesquisa, que utiliza o valor da distância focal da câmara.

Para definir os procedimentos metodológicos e realizar a análise posterior dos resultados, algumas etapas foram desenvolvidas. Observam-se no fluxograma (Figura 6), as etapas realizadas em campo desde a seleção da espécie araucária até a etapa final que consiste no processamento dos dados.

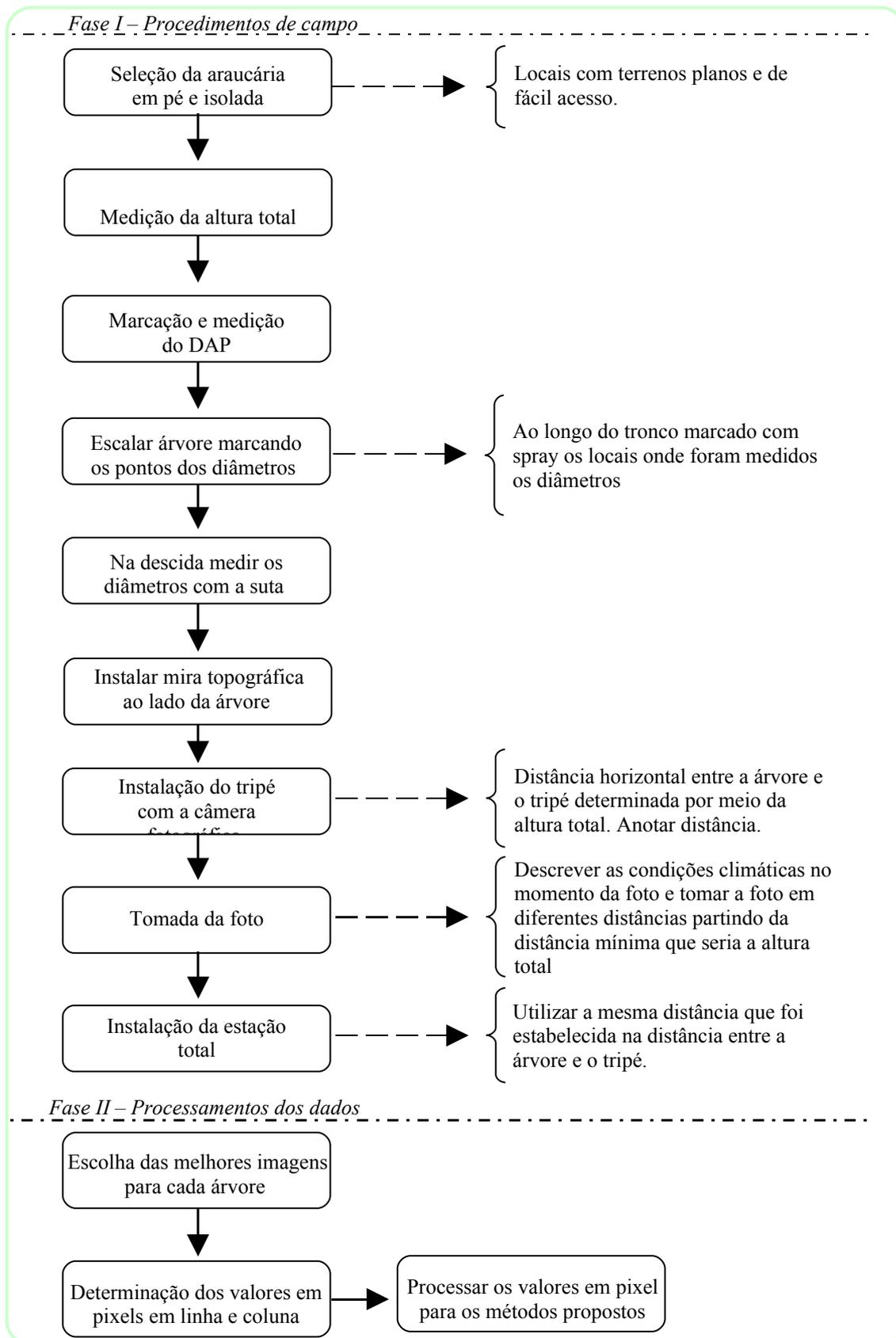
As etapas baseiam-se em dois momentos, primeiro os procedimentos realizados em campo e segundo o processamento das fotos para aplicação da metodologia proposta.

#### **4.4.1. MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS PROPOSTOS E TESTADOS**

Os três métodos de fotogrametria terrestre desenvolvidos na presente pesquisa estão descritos na Figura 6.

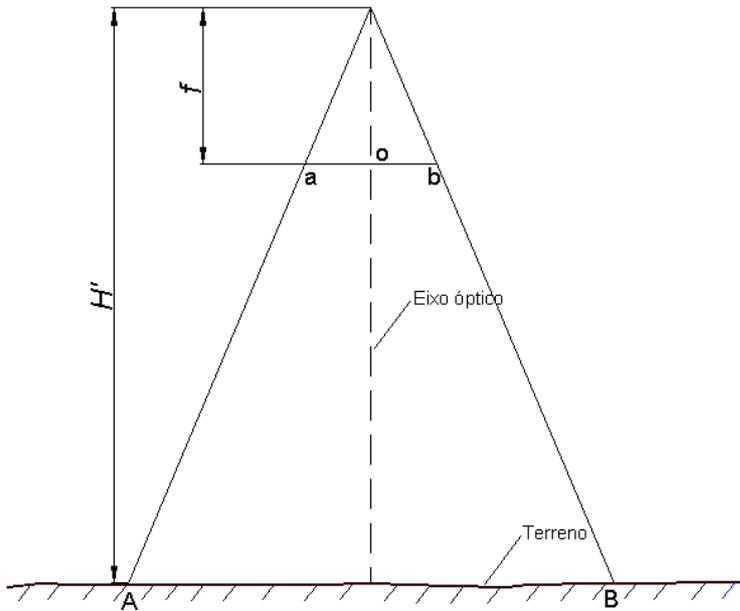
##### **4.4.1.1. Método Escala/Fotografia (Método 1)**

Consiste na determinação da escala na fotografia, que é dada pela distância focal sobre a distância entre a árvore e a tomada da foto. Na calibração da câmara, a distância focal obtida foi de 5,0348 mm, ou 0,0050348 m, para o infinito. O infinito é especificado como medida padrão, para evitar as variações na distância interna, que ocorrem quando a lente não está focalizando o infinito. A distância focal é geralmente definida como a distância existente do centro ótico da lente ao plano focal da câmara, com a lente focada no infinito, visto que qualquer objeto a uma grande distância é considerado como estando no infinito.



**Figura 6.** Procedimentos realizados em campo (Fase I) e processamentos dos dados (Fase II).

O método é caracterizado pela sua simplicidade, porém é indispensável conhecer alguns parâmetros da câmara fotográfica como a distância focal e o tamanho do sensor. Esse método possui a mesma concepção de escala quando a imagem for tomada verticalmente, isto é, com um plano de vôo, conhecendo a altura de vôo e a distância focal (Figura 7).



**Figura 7.** Visão de uma fotografia vertical em terreno plano.

A escala de uma fotografia vertical tomada em um terreno plano é a razão entre a distância  $\overline{ab}$  da foto sobre a correspondente distância no terreno  $\overline{AB}$

Essa escala pode ser expressa pela distância focal  $f$  sobre a altura de vôo  $H$ , igualando os triângulos semelhantes da seguinte forma:

$$E = \frac{\overline{ab}}{\overline{AB}} = \frac{f}{H'} \quad (2)$$

Onde:

$E$  = escala

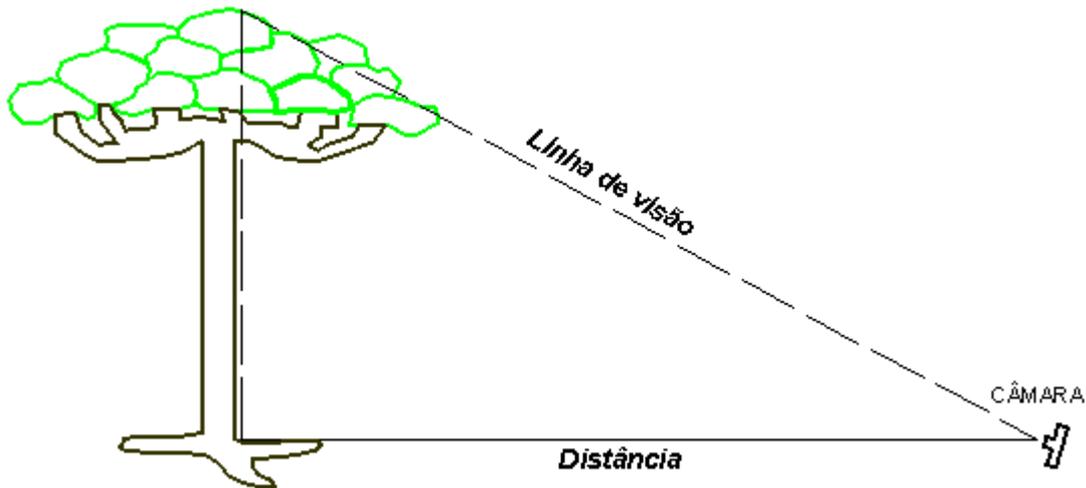
$f$  = distância focal (metros)

$H'$  = altura do vôo (metros)

Necessariamente a escala em uma fotografia não é constante visto que depende do relevo. Essa situação ocorre principalmente em terrenos acidentados, onde a altura do vôo

muda (altitude constante) em relação à superfície terrestre e, por conseguinte, a escala. No projeto em questão, consideramos, em uma aproximação, a escala como se fosse constante em toda a foto.

Utilizando o princípio da escala de fotografia aérea vertical tem-se do mesmo modo a determinação da escala para a fotografia tomada no terreno. Porém a diferença básica que se tem é a utilização da distância entre o objeto e a câmara, em vez do que ocorre na foto aérea, com a altura de vôo e a superfície terrestre. Na Figura 8, pode-se observar o modo da tomada da foto em campo, com a distância na horizontal.



**Figura 8.** Visão da tomada da foto.

Conseqüentemente, observando a Figura 8 acima, a escala das fotos terrestres é definida pela razão entre a distância focal da câmara e a distância, em metros, do objeto como descrito a seguir.

$$E = \frac{f}{D} \quad (3)$$

Onde:

E = escala

f = distância focal = 0,0050348.

D = distância entre o objeto e o observador.

Determinada a escala da foto, multiplica-se pelo tamanho do pixel e pela diferença entre os pixels do lado direito e esquerdo que estabelece o limite do tronco na foto, conforme a equação 4. Essa formulação procede na determinação dos diâmetros ao longo do tronco.

$$Di_{(1)} = \frac{[(X_d - X_e) \times E \times R_p]}{1000} \quad (4)$$

Onde:

$Di_{(1)}$  = determinação do diâmetro pelo método 1.

$X_d$  = abscissa de pixel observado ao lado direito do tronco.

$X_e$  = abscissa de pixel observado ao lado esquerdo do tronco.

$E$  = escala calculada.

$R_p$  = resolução do pixel = 0,00154 mm.

Um detalhe que deve ser levado em conta é a inclinação do eixo óptico, uma vez que para a maioria das árvores, as fotos não foram tomadas paralelamente ao tronco, com o eixo na vertical, isto é, distâncias estabelecidas entre a câmara e o objeto sendo menor ou igual a altura total da árvore. Tal fato, necessariamente não altera na escala.

Do mesmo modo foi estabelecida a altura dos diâmetros demarcados utilizando as coordenadas de pixels no eixo  $y$ . Foram processados os valores de  $y$  para cada demarcação partindo da base do tronco ( $y_0$ ), e posteriormente feita a diferença entre os valores até a última altura demarcada, da seguinte maneira:

$$h_{i1} = Y_0 - Y_1 \quad (5)$$

Onde:

$h_{i1}$  = diferença em pixel entre a primeira e a segunda altura demarcada ao tronco.

$Y_0$  = ordenada de pixel observado na primeira demarcação.

$Y_1$  = ordenada de pixel observado na segunda demarcação.

O cálculo da altura ao longo do tronco é baseado no mesmo princípio do cálculo do diâmetro, dado pela linearização, sem considerar a distorção da foto, como pode ser observado a seguir:

$$Hi_{(1)} = \frac{h_i \times E \times R_p}{1000} \quad (6)$$

Onde:

$Hi_{(1)}$  = determinação da altura pelo método 1.

$h_i$  = diferença em pixel entre a primeira e a segunda altura demarcada ao tronco.

$E$  = escala calculada.

$R_p$  = resolução do pixel = 0,00154 mm.

Tem-se, portanto, o cálculo da diferença entre as alturas e dessa forma para comparação da altura real deve ser feito a somatória acumulada dessa diferença.

#### 4.4.1.2. Método da Mira Topográfica (Método 2)

Baseia-se no uso da mira topográfica de 4 metros, determinou-se a quantidade de pixels por metro na imagem da árvore.

A imagem da mira na fotografia digital permitiu determinar o tamanho individual do pixel no terreno, em cada imagem. A diferença dos valores  $y$  lidos, na imagem, na base e no topo da mira, dividido por 4 m, resultou na determinação do valor individual do tamanho do pixel em cada imagem, assumido como constante nas direções  $x$  e  $y$ . A diferença de valores em  $x$ , medidos nos extremos de cada diâmetro da árvore na altura considerada, multiplicado pelo valor individual do pixel resulta na respectiva medida do diâmetro da árvore naquela altura. O cálculo consiste nas seguintes formulações:

$$R = \frac{Y_0 - Y_4}{M} \quad (7)$$

Onde:

R = resolução espacial do pixel na foto.

$Y_0$  = ordenada de pixel observado na base da mira (0 m).

$Y_4$  = ordenada de pixel observado no topo da mira (4 m).

M = tamanho da mira = 4 metros.

Para calcular o diâmetro deve-se subtrair abscissa de pixel observado no lado direito e no lado esquerdo do tronco nos locais demarcados e dividir pelo tamanho da mira topográfica, neste caso, 4 metros, conforme fórmula a seguir:

$$Di_{(2)} = \frac{(X_d - X_e)}{R} \quad (8)$$

Onde:

$Di_{(2)}$  = determinação do diâmetro pelo método 2.

$X_d$  = abscissa de pixel observado ao lado direito do tronco.

$X_e$  = abscissa de pixel observado ao lado esquerdo do tronco

R = resolução espacial do pixel na foto.

No cálculo da altura, utiliza-se a mesma resolução espacial calculada, porém os valores em pixel foram determinados no eixo  $y$ . Do mesmo modo que estabelecido no método 1, a diferença se dá entre os valores de pixels, estes no eixo  $y$  demarcados na imagem, partindo-se da base do tronco ( $y_0$ ). A altura estimada corresponde à diferença entre a primeira a segunda altura, portanto, também como descrito no método 1, deve ser feito a somatória acumulada dessa diferença.

$$Hi_{(2)} = \frac{h \cdot n}{R} \quad (9)$$

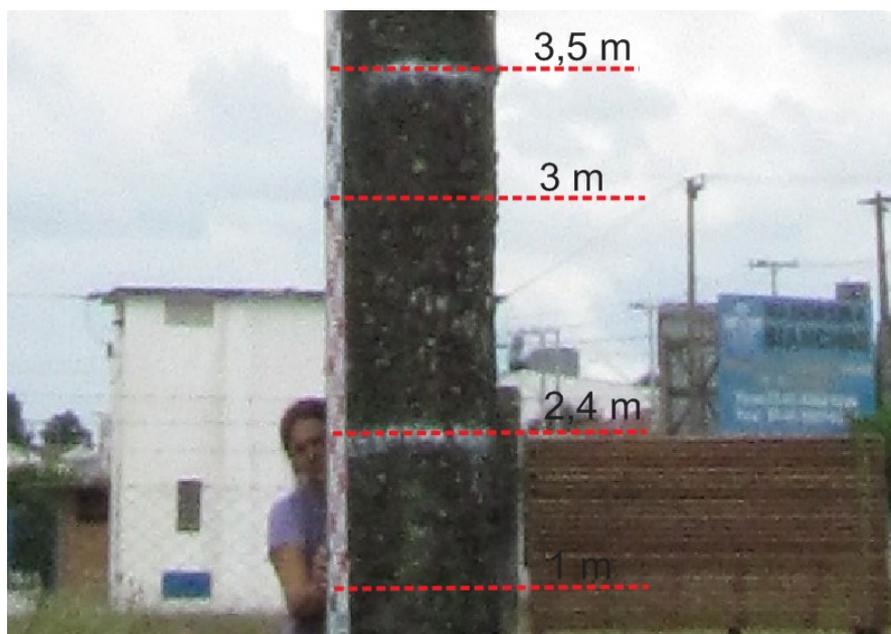
Onde:

$Hi_{(2)}$  = Determinação da altura pelo método 2.

h = diferença em pixel para cada altura demarcada ao longo do tronco.

R = resolução espacial do pixel na foto.

Neste método também foi constatado a questão das distâncias para a tomada das fotos, pois distâncias maiores que 15 metros, ou até mesmo distâncias de 13 metros, ocasionaram dificuldades na visualização da escala da mira topográfica, devido a distorções na resolução da imagem. Essa situação pode ser observada na Figura 9, visto que a altura da árvore é de 20 metros e nos primeiros testes foram estabelecidas distâncias semelhantes à altura. A foto em questão foi tomada a uma distância de 18 metros.



**Figura 9.** Imagem tomada a 18 metros de distância.

#### **4.4.1.3. Método de Fotogrametria Terrestre com uma Imagem-Singular (Método 3).**

O método em questão foi desenvolvido em 1985 por Dehn et al. (1985) e Dehn (1987) e os procedimentos foram detalhados por Gaffrey et al. (2001) em publicação no Journal of Forest Science. Os resultados das pesquisas de Gaffrey et al. (2001) mostraram que o desvio padrão do diâmetro torna-se maior com o aumento da distância entre o observador e o objeto. A câmara utilizada de 35 mm era equipada com uma lente de 28 mm. Ao lado da árvore, foi instalada uma escala de alumínio de 5 metros com 3 pontos marcados. A distância utilizada entre a câmara e a árvore foi de 22 metros com árvores de altura médias de 23 metros, Foi constatado nos resultados obtidos que a distância influenciava no erro aleatório, como se

constatou para as distâncias de 25 e 50 metros, as quais resultaram desvios padrão de 0,6 cm e 1,0 cm em diâmetro, respectivamente. A uma distância de 22 metros e altura média de 32 metros, o desvio padrão foi de 0,8 cm.

No método em questão, foi utilizado o modelo matemático da transformação projetiva. Esta transformação requer quatro pontos de controle no mínimo para sua execução. Sendo  $p$  um ponto aleatório no plano, com coordenadas  $(x_a, y_a)$  no sistema  $s$  e  $(X_a, Y_a)$  no sistema  $S$ , pode-se escrever a transformação projetiva, onde os parâmetros dessa transformação que relacionam os dois sistemas envolvidos são  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  e  $a_8$ .

O modelo funcional da transformação projetiva é dado pelas seguintes equações:

$$X_b = \frac{a_1 x_a + a_2 y_a + a_3}{a_7 x_a + a_8 y_a + 1} \quad (10)$$

$$Y_b = \frac{a_4 x_a + a_5 y_a + a_6}{a_7 x_a + a_8 y_a + 1} \quad (11)$$

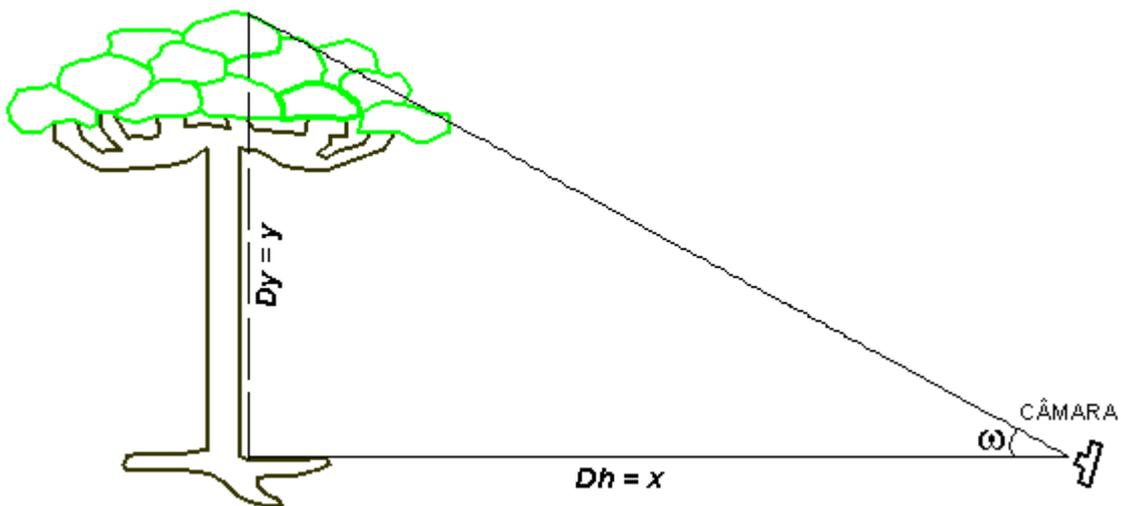
Em que:

$X_b, Y_b$  = coordenadas dos pontos observadas no espaço B.

$x_a, y_a$  = coordenadas dos pontos observadas no espaço A.

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  e  $a_8$  = parâmetros de transformação.

A derivação de uma nova equação para  $Y$  é baseada na Figura 10.



**Figura 10.** Representação de  $x$  e  $y$ .

Conforme a Figura 10,  $y$  representa a altura da árvore referenciada com uma mira topográfica colocada ao lado, e  $x$  a distância horizontal entre a câmara e a árvore. Estabelecendo  $x = 0$ , tem-se:

$$a_4 = a_7 = 0.$$

Deste modo, isolando o  $Y$  tem-se a seguinte equação:

$$Y = \frac{c_1 y' + c_3}{c_2 y' + 1} \quad (12)$$

$c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  = parâmetros de transformação.

$y'$  = coordenadas fotogramétricas digitais medidas das imagens.

A equação 12 corresponde à altura calculada ao longo da árvore. Nesta mesma equação tem-se o  $y'$ , que é determinado como coordenada na imagem. O valor de  $y'$  é calculado da seguinte maneira:

$$y' = (Y_n - I) \times R_p \quad (13)$$

Onde:

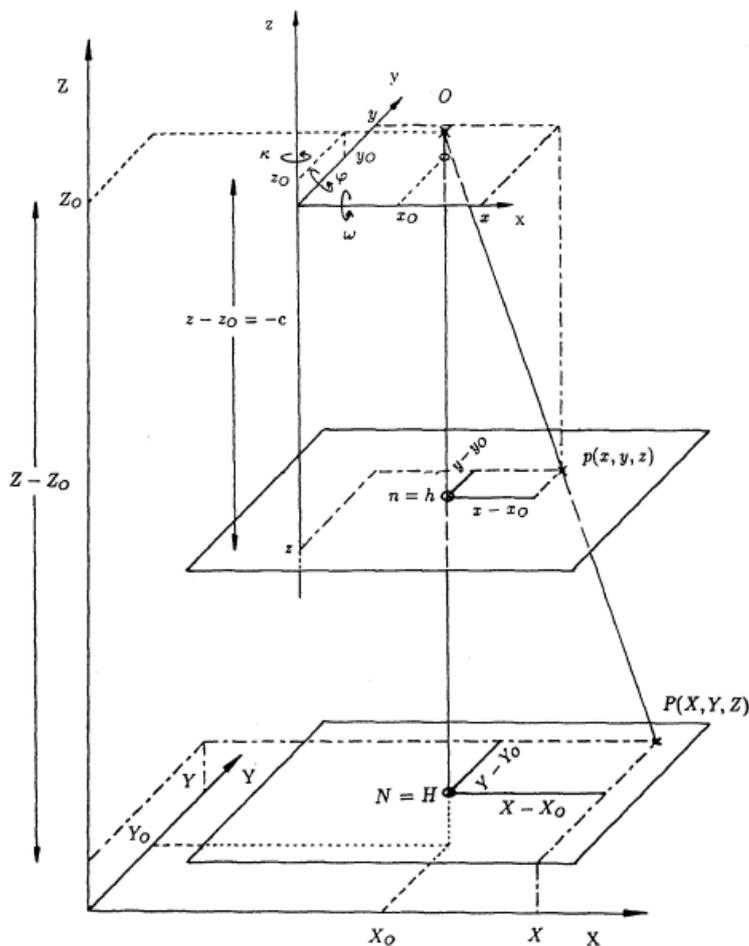
$Y_n$  = valor em pixel observado na imagem na marcação.

$I$  = Metade do tamanho da imagem na vertical = 2000 pixels.

$R_p$  = resolução do pixel = 0,00154 mm.

Na equação, o valor de  $I$  equivale a metade do tamanho da imagem, isto é, na vertical a imagem esta câmara é de 4000 pixels e o 0,00154 mm equivale ao tamanho de cada pixel. A câmara utilizada na pesquisa possui tamanho de pixel igual a 0,001540 mm com 3000 x 4000 pixels.

Observando a Figura 11, também é possível encontrar a mesma equação de  $Y$  para determinação da altura em metros. A Figura mostra o sistema de coordenadas XYZ que tem origem no centro de projeção de  $O$ , tendo o eixo  $z$  perpendicular ao plano imagem.



**Figura 11. Condições de imagem no nadir com fonte aleatoriamente selecionada para gravação de imagem e objeto sistema de coordenadas (imagem positiva).**

Considerando a Figura 11, têm-se as seguintes equações:

$$\frac{X - X_0}{Z - Z_0} = \frac{x - x_0}{z - z_0} \quad (13)$$

$$\frac{Y - Y_0}{Z - Z_0} = \frac{y - y_0}{z - z_0} \quad (14)$$

Os procedimentos em campo levam à rotação de alguns dos eixos do plano cartesiano. Avaliando os procedimentos em campo, tem-se a rotação do eixo  $x$ , uma vez que na tomada da foto há certa inclinação da câmara montada no tripé para obter a imagem da árvore inteira. Neste caso, tem-se a rotação em torno do eixo  $x$ , ou seja, pelo ângulo  $\omega$ , por transformação

ativa, que se entende como aquela na qual o espaço é transformado, rotacionando os referenciais  $x', y'$  e  $z'$ , conforme transformação a seguir.

Onde  $z'$  = distância focal.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \text{sen} \omega \\ 0 & -\text{sen} \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ -c \end{bmatrix}$$

Multiplicando a matriz tem-se:

$$\begin{aligned} x_p &= x'_p \\ y_p &= \cos \omega y'_p + c \text{sen} \omega \\ z_p &= \text{sen} \omega y'_p - c \cos \omega \end{aligned} \tag{15}$$

Considerando que:

$$\begin{aligned} X_0 &= Z_p = 0 \\ x_0 &= y_0 = z_0 = 0 \\ Z_p - Z_0 &= A \end{aligned}$$

Substituindo na equação na (14):

$$\frac{Y_p - Y_0}{A} = \frac{y_p}{z_p} \quad \text{Sabendo que:} \quad \begin{aligned} y_p &= \cos \omega y'_p + c \text{sen} \omega \\ z_p &= \text{sen} \omega y'_p - c \cos \omega \end{aligned}$$

Tem-se:

$$\frac{Y_p - Y_0}{A} = \frac{\frac{1}{-c} y'_p \text{tg} \omega}{\frac{\text{tg} \omega}{-c} y'_p + 1}$$

Seguindo na mesma equação, isolando  $Y_p$ :

$$Y_p = Y_p + \frac{\frac{A}{-c} y'_p - A \operatorname{tg} \omega}{\frac{\operatorname{tg} \omega}{-c} y'_p + 1}$$

Procedendo das operações matemáticas cabíveis, tem-se finalmente a seguinte equação:

$$Y = \frac{c_1 y' + c_3}{c_2 y' + 1} \quad (16)$$

Substituindo as considerações (15) na equação (13), tem-se:

$$\frac{X_p}{A} = \frac{x_p}{z_p} \quad \text{Sabendo que:} \quad \begin{aligned} x_p &= x'_p \\ z_p &= \operatorname{sen} \omega y'_p - c \operatorname{cos} \omega \end{aligned}$$

$$\frac{X_p}{A} = \frac{x'_p}{c_2 y'_p + 1}$$

Isolando  $X_p$  tem-se a equação que determina o diâmetro na seção geométrica da árvore:

$$X_p = \frac{x'_p \frac{A}{\operatorname{cos} \omega c}}{c_2 y'_p + 1} \quad (17)$$

Todavia, o  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  foram obtidos pelas seguintes fórmulas:

$$c_1 = \frac{-A - Y_0 \operatorname{tg} \omega}{c} \quad (18)$$

$$c_2 = \frac{-\operatorname{tg} \omega}{c} \quad (19)$$

$$c_3 = Y_0 - A \operatorname{tg} \omega \quad (20)$$

Sabendo que o ângulo  $\omega$  pode ser calculado pela equação:

$$\omega = \arctg(c.c_2)$$

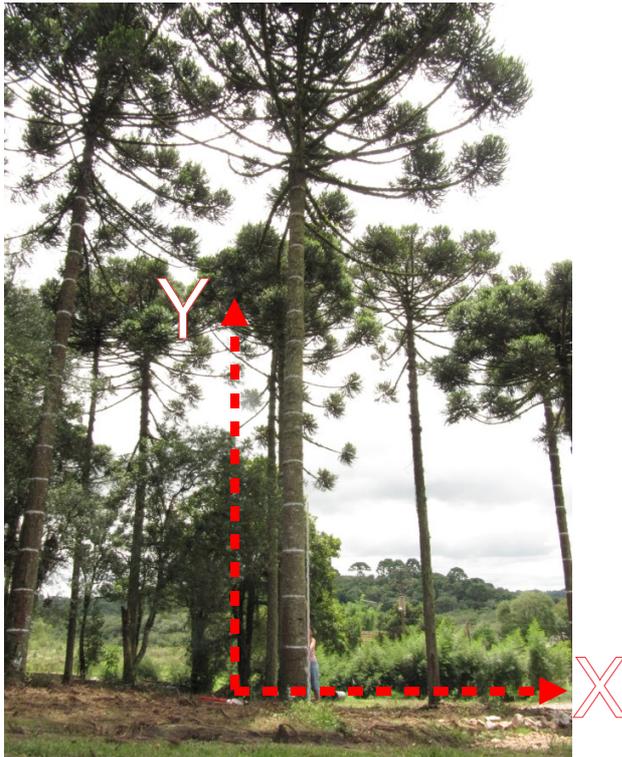
$\omega$  = ângulo que define a atitude da câmara em relação ao referencial objeto.

#### **4.4.2. OBSERVAÇÕES DOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS**

Após a coleta de dados, estes foram submetidos ao processamento que consiste na determinação dos pixels na imagem. O processo de averiguação dos pixels poderia ter sido realizado em qualquer software de Photoshop. Na presente pesquisa, utilizou-se o software CorelDraw X3.

Foram selecionadas as melhores imagens, levando em conta a qualidade visual. Na análise das imagens foram observados que alguns efeitos, como por exemplo, as interferências das condições climáticas podem afetar a qualidade da imagem e por isto, foram tomadas medidas corretivas, como contraste e filtros para cada árvore. Para contornar esses efeitos, as fotos foram tomadas em diferentes distâncias, dependendo da altura da árvore. Com auxílio dos recursos da câmara digital foram modificadas em campo, para cada foto, algumas configurações básicas tais como: tempo de exposição e abertura do diafragma que alteram a iluminação da imagem para clara ou escura.

Foram determinados os valores em pixels nos eixos  $x$  e  $y$ , sendo que o eixo  $x$  está relacionado com diâmetro e o  $y$  com altura, conforme Figura 12. Para todos os métodos foi necessário conhecer os valores em  $y$  e  $x$ . Os valores em  $y$  devem ser determinados desde a base da árvore até a última altura marcada. Além dos locais marcados também devem ser determinados os valores de  $y$  ao longo da mira topográfica, conforme descrito no item 4.4.1.2.



**Figura 12.** Referencial  $x, y$  na imagem da árvore.

#### **4.4.3. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA**

A amostra coletada teve seus parâmetros estatísticos básicos determinados (média, variância, desvio padrão, valores mínimos e máximos, coeficiente de variação).

Após a aplicação dos métodos testados, as mesmas estatísticas foram determinadas a fim de caracterizar os resultados obtidos para cada método testado e para a testemunha (valores medidos com a suta escalando a árvore).

#### **4.4.4. AJUSTE DE EQUAÇÃO DE VOLUME E DE FUNÇÕES DE AFILAMENTO**

Para fins de comparação, procedeu-se o ajuste de uma equação de volume e de uma função de afilamento a partir dos dados de diâmetro e altura ao longo do tronco obtido pelo método tradicional (Suta) e pelos três métodos testados.

Como já dito anteriormente, no ajuste de modelos volumétricos e de afilamento, o método mais utilizado na coleta de dados é a cubagem rigorosa, que é baseada na medição sucessiva de diâmetros ao longo do tronco com seções de comprimento iguais ou não, sendo que no cálculo do volume real são utilizadas fórmulas geométricas. Desta forma, os volumes utilizados no ajuste da função de volume foram calculados por Smalian (equação 21) a partir dos diâmetros nas várias alturas obtidos com a Suta e pelos 3 métodos testados.

Na obtenção do volume individual foi utilizada a fórmula de Smalian, que é dada por:

$$v = \frac{g_1 + g_2}{2} \times \ell \quad (21)$$

Em que:

$v$  = volume de Smalian de cada seção, em  $m^3$ .

$g_1$  = área transversal na base de seção, em  $m^2$ .

$g_2$  = área transversal no topo da seção, em  $m^2$ .

$\ell$  = comprimento da seção, em m.

Para estimar o volume total foi ajustado o modelo de Schumacher-Hall, conhecido como:

$$v = b_0 \cdot DAP^{b_1} \cdot h^{b_2} \quad (22)$$

O modelo de Schumacher-Hall é um modelo não linear de dupla entrada em que o volume é estimado em função do diâmetro (DAP com casca) e da altura total (h).

Para facilitar o ajuste e corrigir problemas estatísticos relacionados às pressuposições básicas da regressão, como a normalidade dos erros e a heterocedasticidade da variância, o modelo de Schumacher-Hall normalmente é ajustado na sua forma linear, dado por:

$$\ln v = b_0 + b_1 \ln DAP + b_2 \ln h \quad (23)$$

Onde:

v = volume total com casca (m<sup>3</sup>).

DAP = diâmetro a 1,30 m de altura (cm).

h = altura total (m).

b<sub>i</sub> = Parâmetros dos modelos a serem estimados.

ln = logaritmo natural.

Por outro lado, o polinômio de 5º grau foi ajustado para expressar o perfil médio dos dados obtidos com a suta (testemunha) e com os dados obtidos pelos três métodos testados. O Polinômio de 5º grau tem a seguinte expressão:

$$\frac{d_i}{DAP} = b_0 + b_1 \left( \frac{h_i}{h} \right) + b_2 \left( \frac{h_i}{h} \right)^2 + b_3 \left( \frac{h_i}{h} \right)^3 + b_4 \left( \frac{h_i}{h} \right)^4 + b_5 \left( \frac{h_i}{h} \right)^5 \quad (24)$$

Onde:

DAP = Diâmetro com casca 1,30 m de altura (cm).

d<sub>i</sub> = Diâmetro do tronco medido a uma altura h<sub>i</sub> (cm).

h<sub>i</sub> = Altura medida ao longo do tronco (m).

h = Altura total (m).

b<sub>i</sub> = Parâmetros dos modelos a serem estimados.

Os modelos de afilamento e volume foram avaliados pelas estatísticas Coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e pelo Erro Padrão de Estimativa em porcentagem (Syx%) para as variáveis de interesse, além de análise gráfica dos resíduos.

#### 4.4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS TESTADOS

Para verificar a existência ou não de diferenças entre os tratamentos (testemunha mais os três métodos testados) foi utilizado o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), realizando-se primeiramente a Análise de Variância e aplicando-se o teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) nos casos em que a ANOVA foi significativa.

No delineamento empregado (DIC) foram comparados os seguintes tratamentos:

T0 – Diâmetros medidos com a suta ou Alturas medidas com a estação total;

T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1);

T2 – Método da Mira Topográfica (Método 2);

T3 – Método de Fotogrametria Terrestre com uma Imagem-Singular (Método 3).

As repetições são as diferentes alturas e/ou diâmetros medidos ao longo do tronco, totalizando 584 medidas observadas em campo.

Os métodos testados para estimar diâmetros foram avaliados estatisticamente considerando-se todos os diâmetros estimados ao longo do tronco e os diâmetros estimados em partes do tronco (diâmetros medidos até 1/3 da altura total, diâmetros medidos entre 1/3 e 2/3 da altura total e diâmetros medidos entre 2/3 e a altura total), visando com isto identificar se os métodos estimam melhor os diâmetros em partes específicas do tronco.

Antes de realizar a ANOVA, foi aplicado o teste de Bartlett ( $\alpha = 0,05$ ) a fim de verificar se as variâncias eram homogêneas.

Visto que nem sempre as variâncias foram homogêneas, recomenda-se a transformação de dados que é feita de acordo com a natureza da cada experimento, porém, em alguns casos, mesmo transformando os dados, não se conseguiu a homogeneidade das variâncias. Este fato ocorreu com os dados gerados nesta pesquisa.

Quando isto ocorre, em geral, aplicam-se testes estatísticos não-paramétricos. Esses testes são usados para comparar distribuições de dados quanto à locação, quanto à variabilidade ou ainda para avaliar a correlação entre variáveis.

Há um grande número de técnicas não-paramétricas descritas na literatura e uma das mais conhecidas é o teste do qui-quadrado. Outras técnicas comuns que podem ser citadas são: o teste  $U$  de Wilcoxon-Mann-Whitney, que corresponde ao teste  $t$  para amostras independentes, o teste  $T$  de Wilcoxon, correspondente ao teste  $t$  para amostras emparelhadas, o teste de McNemar para proporções em amostras emparelhadas, o coeficiente de Spearman para postos e o teste Exato Fischer, que substitui o qui-quadrado em tabelas 2x2 quando a amostra é pequena. No entanto, na presente pesquisa foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis, que é uma ANOVA não-paramétrica de comparação de três ou mais grupos independentes em  $k$  amostras.

Os procedimentos para a realização do teste de Kruskal-Wallis baseiam-se:

1 – Dispor, em postos, as observações de todos os grupos em uma única série, atribuindo de 1 a N.

2 – Determinar o valor de R (soma dos postos) para cada um dos grupos de postos.

3 – Determinar  $H_{\text{cal}}$  (valor real do teste) pela fórmula:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (25)$$

Onde:

$n_i$  = tamanho de cada tratamento.

$N = \sum n_i$  = número total de indivíduos.

$R_i$  = soma dos postos em cada tratamento.

$H$  = Estatística  $H$

4 – O valor teórico  $Qui_{\text{tab}}$  é obtido por meio de uma tabela de distribuição de Qui-quadrado.

5 – Por último, comparar o valor real  $H$  com o valor teórico de  $Qui_{\text{tab}}$ . Se  $H$  calculado for menor que  $Qui_{\text{tab}}$  tabelado não se pode rejeitar a hipótese nula.

Compara-se o valor teórico  $Qui_{\text{tab}}$  que é obtido por meio de uma tabela da distribuição de Qui-quadrado com o valor real  $H$ . Se  $H$  calculado for menor que  $Qui_{\text{tab}}$  tabelado não se pode rejeitar a hipótese nula, ou seja, os métodos podem ser considerados equivalentes.

Na estatística não-paramétrica quando a ANOVA é significativa, aplica-se o teste de Dunn com 5% de probabilidade ( $\alpha = 0,05$ ). Este teste é utilizado na identificação de diferenças particulares entre médias dos tratamentos, tomando-as duas a duas, como o teste de Tukey para dados paramétricos.

O teste de Dunn é aplicado sobre os postos médios obtidos nas amostras. Inicialmente ordenam-se do maior ao menor os postos médios obtidos nas amostras. Calculam-se a seguir as diferenças entre estes valores dois a dois, começando pela diferença maior. Procede-se depois, usando, para o teste, a estatística:

$$Q_{\text{calc}} = \frac{R_A - R_B}{EP} \quad (26)$$

onde  $R_A$  e  $R_B$  são os postos médios de duas amostras diferentes. O erro padrão (EP) é dado por:

$$EP = \sqrt{\frac{N(N+1)}{12} \left( \frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right)} \quad (27)$$

onde  $n_A$  e  $n_B$  são os tamanhos das duas amostras que estão sendo comparadas e  $N$  é o total de indivíduos estudados, incluindo todas as amostras do experimento.

Cada valor de  $Q_{calc}$  é comparado com um valor crítico  $Q_{\alpha;k}$  tabelado. Se o valor calculado for igual ou maior que o tabelado, rejeita-se a hipótese de igualdade entre os grupos que estão sendo comparados.

A análise comparativa entre os diferentes métodos de estimativa da variável diâmetro receberam tratamentos estatísticos que foram processados pelo Software Minitab. Cada tratamento contém 584 repetições, gerando um total de 2336 observações.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. DESCRIÇÃO DA AMOSTRA

A amostra foi composta de 50 árvores, distribuídas em classes de DAP e de altura total (Tabela 1).

**Tabela 1.** Distribuição da amostra em classes de DAP e altura total.

Classes de DAP (cm)	Classes de altura total (m)				Total
	12-13,9	14-15,9	16-17,9	18-20	
28 – 33,9	1		1		2
34 – 39,9	1		3	1	5
40 – 45,9	2	4	3	1	10
46 – 51,9	2	6	3	1	12
52 – 57,9	2	4	1		7
58 – 63,9	3	3	2	2	9
64 – 69,9			4	1	5
Total					50

**Tabela 2.** Total de árvores medidas em cada local e respectiva quantidade de diâmetros (di) medidos ao longo do tronco por árvore.

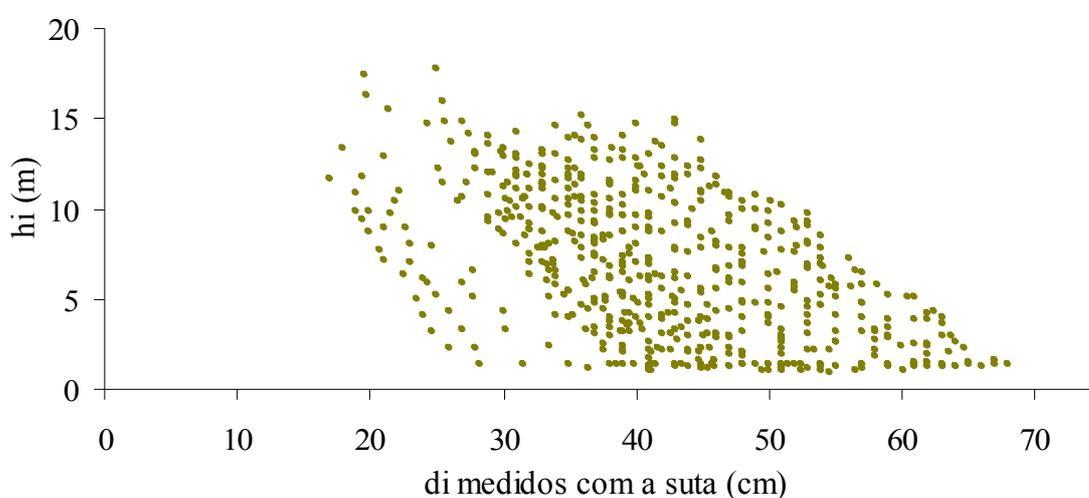
Área Urbana e Rural		
Localização - Bairro	Números de árvores medidas	Diâmetros (di) medidos em diferentes alturas por árvore
Cruzeiro	6	15, 13, 19, 12, 10, 10
Costeira	5	10, 13, 12, 14, 13
Colônia Rio Grande	10	14, 10, 12, 12, 14, 12, 12, 13, 12, 11
Guatupê	10	6, 6, 5, 6, 6, 6, 7, 5, 6, 7
Zacarias	3	12, 10, 15
Colônia Murici	14	15, 9, 13, 14, 13, 10, 12, 11, 15, 14, 11, 13, 12, 13
Mergulhão	2	23, 20
Total	50	584

Foram medidos 584 diâmetros em diferentes alturas ao longo do tronco (Tabela 2). Observa-se nesta tabela que a amostra foi separada por bairros indicando os locais onde as árvores foram amostradas. As principais estatísticas da amostra estão na Tabela 3.

**Tabela 3.** Principais estatísticas da amostra.

<b>Estatísticas</b>	<b>di (cm)</b>	<b>DAP (cm)</b>	<b>Altura Total (m)</b>
Mínimas	17	28	12
Médias	42	51	15
Máximas	68	68	20
Desvio Padrão (cm)	10,40	9,70	1,82
Coefficiente de Variação (%)	24,73	19,17	11,75

Na Figura 13, têm-se uma pequena noção das diferentes alturas, nas quais foram medidos os diâmetros com a suta, enquanto que na Tabela 4, tem-se a quantidade de diâmetros (di) medidos nas várias porções do tronco.



**Figura 13.** Diâmetros medidos com a suta em diferentes alturas.

**Tabela 4.** Distribuição dos diâmetros (di) da amostra em classes de altura (hi) ao longo do tronco.

<b>Classes de altura hi (m)</b>	<b>Frequência</b>
1 – 2	111
3 – 4	92
5 – 6	89
7 – 8	83
9 – 10	84
11 – 12	75
13 – 14	36
15 – 16	12
17 – 18	2
<b>Total</b>	<b>584</b>

## 5.2. ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS AO LONGO DO TRONCO PARA OS MÉTODOS TESTADOS

### 5.2.1. ESTATÍSTICAS BÁSICAS DOS TRATAMENTOS

Na Tabela 5 podem ser visualizadas as estatísticas descritivas da variável diâmetro ao longo do tronco (di) medidas com a suta e estimadas pelos três métodos testados.

**Tabela 5.** Média, Variância, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação do diâmetro ao longo do tronco (di), por tratamento.

Método	Quantidade de diâmetros (di)	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Variância (cm <sup>2</sup> )	CV (%)
T1	584	40	11,72	137,93	29,27
T2	584	38	11,43	130,99	29,91
T3	584	41	9,98	99,55	24,44
T0	584	42	10,40	108,39	24,73

Em que: T0 – Diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3).

As estatísticas da Tabela 5 indicam similaridade nos resultados, mas mostra também que a dispersão dos dados nos três métodos testados é grande, com coeficientes de variação maiores que 24%, fato este que também se observou na testemunha (diâmetros medidos com a suta). Isto era esperado tendo em vista que os troncos das árvores não são cilíndricos e os diâmetros medidos com a suta nas várias alturas ao longo dos fustes variaram de 17 a 68 cm.

#### 5.2.1.1. Avaliação dos métodos considerando-se todos os diâmetros estimados ao longo do tronco

O teste de Bartlett indicou que as variâncias não são homogêneas, levando então à aplicação de várias transformações como:  $\log(y)$ ,  $\text{raiz}(y)$ ,  $\ln(y)$  e  $1/y$ . Mesmo com essas transformações, as variâncias dos tratamentos continuaram heterogêneas. Desta forma, foi necessário aplicar a estatística não-paramétrica e para tal, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis (Tabela 6), conforme está descrito na metodologia (item 4.4.5).

**Tabela 6.** Teste não paramétrico de Kruskal-Wallis

<b>Tratamento</b>	<b>Valor</b>
H	42,99
Graus de Liberdade	3
<i>p</i> -valor	0,000

Considerando-se que o *p*-valor apresenta valor menor que 0,05, há uma diferença significativa entre as médias dos tratamentos, rejeitando-se a hipótese nula.

**Tabela 7.** Comparação entre os tratamentos com a estatística do teste de Dunn.

<b>Tratamentos Comparados</b>	<b>Diferença observada</b>	<b>Diferença crítica</b>	<b>Diferença</b>
T1-T2	106,269	104,136	Sim
T1-T3	67,257	104,136	Não
T1-T0	142,694	104,136	Sim
T2-T3	173,526	104,136	Sim
T2-T0	248,964	104,136	Sim
T3-T0	75,437	104,136	Não

Em que: T0 – Diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3).

Na comparação múltipla de médias dois a dois entre os métodos para a variável diâmetro, observou-se que há diferença significativa entre algumas médias dos tratamentos comparadas dois a dois com 5% de probabilidade ( $\alpha = 0,05$ ) (Tabela 7).

Conforme o teste de Dunn (Tabela 7), na comparação múltipla de médias, não há estatisticamente diferença significativa entre os métodos 1 e 3, mas os métodos 1 e 2 diferem dos diâmetros medidos com a suta. Constata-se, portanto, que apenas os diâmetros medidos pelo método 3 são estatisticamente iguais aos diâmetros medidos com a suta.

#### **5.2.1.2. Avaliação dos métodos testados para estimar diâmetros em partes do tronco**

Os diâmetros medidos pelos métodos testados foram agrupados em três classes da altura total (porções de 1/3 da altura total) a fim de avaliar a performance dos métodos nas várias alturas da árvore.

Para a primeira porção do tronco (diâmetros (di) medidos até 33,3% da altura total) foi observado um total de 234 diâmetros, com 224 diâmetros para a parte mediana do tronco e 126 diâmetros para a parte final do tronco.

Para a primeira porção do tronco, o teste de Bartlett indicou que as variâncias eram homogêneas, e então o Delineamento Inteiramente Casualizado foi aplicado para as análises (Tabela 8).

**Tabela 8.** Análise de variância entre os tratamentos (T1, T2, T3 e T0) para os diâmetros estimados na 1ª porção dos fustes.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste <i>F</i>	Valor de <i>p</i>
Entre os grupos	3	964	321	3,19	0,023
Dentre os grupos	932	94359	101		
Total	935	95266			

O valor de *p* foi menor que 0,05 indicando que há diferenças estatisticamente significativas entre pelo menos dois tratamentos, muito embora ele esteja muito próximo do valor crítico estabelecido ( $\alpha = 0,05$ ). Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9.** Teste de Tukey para as médias dos 4 tratamentos para os diâmetros estimados para a primeira porção do tronco (até 33,3% da altura total).

Tratamentos	Quantidade de diâmetros	Desvio Padrão (cm)	Média dos diâmetros (cm)	
T1	234	10,41	48,81	A
T0	234	9,68	48,16	A
T3	234	9,77	46,53	A
T2	234	10,28	46,50	A

Em que: T0 – Diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente a 5% de significância.

O teste de Tukey indicou não existir diferenças estatisticamente significativas a 5% de probabilidade entre os tratamentos. Certamente este resultado é consequência do *p*-valor do teste *F* da ANOVA muito próximo do valor crítico estabelecido nesta pesquisa. Logo, os três métodos testados geram diâmetros estatisticamente iguais com os diâmetros medidos com a suta.

Na segunda porção do tronco, o teste de Bartlett também indicou que as variâncias eram homogêneas, e então o Delineamento Inteiramente Casualizado foi aplicado para as análises, conforme Tabela 10.

**Tabela 10.** Análise de variância entre os tratamentos (T1, T2, T3 e T0) para os diâmetros estimados na porção mediana dos fustes.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste <i>F</i>	Valor de <i>p</i>
Entre os grupos	3	3520	1173,4	16,09	0,000
Dentre os grupos	892	65066	72,9		
Total	895	68587			

O valor de *p* para a porção mediana dos troncos também foi menor que 0,05 indicando que há diferenças estatisticamente significativas pelo menos entre dois tratamentos. Os resultados do teste de Tukey de comparação de médias são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11.** Teste de Tukey para as médias dos quatro tratamentos para os diâmetros estimados para a segunda porção do tronco (de 33,3% até 66,6% da altura total).

Tratamentos	Quantidade de diâmetros	Desvio Padrão (cm)	Média dos diâmetros (cm)	
T0	224	8,90	40,16	a
T3	224	8,23	38,89	a
T1	224	8,52	36,68	b
T2	224	8,50	35,02	b

Em que T0 – Diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente a 5% de significância.

Os resultados indicaram não existir diferenças estatisticamente significativas a 5% de probabilidade entre os tratamentos T0 e T3, T1 e T2. Neste caso, o método 3 gerou diâmetros estatisticamente iguais com os diâmetros medidos com a suta.

O teste de Bartlett indicou que as variâncias na porção final dos troncos também são homogêneas, portanto o Delineamento Inteiramente Casualizado foi aplicado conforme resultados na Tabela 12.

**Tabela 12.** Análise de variância entre os tratamentos (T1, T2, T3 e T0) para os diâmetros estimados na porção final dos fustes.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste <i>F</i>	Valor de <i>p</i>
Entre os grupos	3	3050	1017	22	0,000
Dentre os grupos	500	22977	46		
Total	503	26025			

O *p-valor* foi menor que 0,05, significando que há uma diferença estatisticamente significativa entre a média dos tratamentos na porção final do fuste a 5% de probabilidade. Na Tabela 13, apresentam-se os resultados do teste de Tukey de comparação de médias múltiplas, os quais indicam não existir diferenças significativas para o nível crítico estabelecido ( $\alpha \leq 0,05$ ) entre os tratamentos T0 e T3 e entre T1 e T2.

**Tabela 13.** Teste de Tukey para as médias dos quatro tratamentos para os diâmetros estimados para a porção final dos troncos (66,6% até 99,9% da altura total).

Tratamentos	Quantidade de diâmetros	Desvio Padrão (cm)	Média dos diâmetros (cm)	
T0	126	7,08	34,21	a
T3	126	7,09	33,91	a
T1	126	6,45	29,92	b
T2	126	6,46	28,55	b

Em que: T0 – Diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, não diferem estatisticamente a 5% de significância.

Finalmente, as análises dos resultados nas três porções do tronco indicam que o método 3 mostrou-se apropriado para estimar diâmetros ao longo do tronco com resultados estatisticamente iguais àqueles obtidos com a suta.

Na Tabela 14 têm-se os resultados do erro médio em percentagem das estimativas de diâmetros pelos três métodos testados em relação aos diâmetros medidos com a suta. O erro médio foi determinado tanto para todos os diâmetros ao longo do tronco como para porções do tronco com a finalidade de verificar se os métodos testados são capazes de gerar diâmetros apropriados em todas as alturas das árvores. No geral, os resultados apontam erros similares na primeira porção do tronco, mas o método 3 é capaz de estimar os diâmetros mais próximos daqueles obtidos com a suta ao longo de todo o fuste.

**Tabela 14.** Erro médio em porcentagem para estimar diâmetros ( $di$ 's) ao longo do tronco e em partes do tronco pelos métodos testados.

Método	Todos	< 1/3 de h	1/3 a 2/3 de h	>2/3 até h
T1	9,73	6,95	10,73	14,25
T2	11,75	6,80	13,95	17,92
T3	8,65	7,12	8,53	12,69

Em que: T0 – Diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3); h - altura total;  $di$  – diâmetro medido ao longo do tronco.

### 5.3. ESTIMATIVAS DE ALTURAS AO LONGO DO TRONCO PELOS MÉTODOS TESTADOS

#### 5.3.1. ESTATÍSTICAS BÁSICAS DOS TRATAMENTOS

Na Tabela 15 podem ser observadas as estatísticas descritivas da variável altura ( $hi$ ) medida ao longo do tronco com a estação total e estimada pelos três métodos testados.

**Tabela 15.** Média, Variância, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação da altura ao longo do tronco.

Método	Altura mínima (m)	Altura máxima (m)	Média (m)	Variância (m <sup>2</sup> )	Desvio Padrão (cm)	CV (%)
T1	1,04	14,75	6,42	11,38	3,37	52,49
T2	1,01	14,13	6,21	10,88	3,30	53,14
T3	0,95	19,20	6,79	25,95	5,09	74,96
T0	0,95	17,70	6,76	15,80	3,98	58,88

Em que: T0 – Alturas medidas com a estação total; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3).

As estimativas obtidas das alturas ao longo do tronco das árvores de araucária com a estação total variaram de 0,95 a 17,70 m com altura média medidas ao longo do tronco de 6,76 m, um desvio padrão de 3,98 m. As informações da Tabela 15 indicam uma alta variabilidade das alturas medidas, resultado óbvio visto que as alturas consideradas são acumuladas e indicam os pontos em que os diâmetros foram medidos. É importante ressaltar que não se trata da altura total, mas de alturas parciais acumuladas.

### 5.3.1.1. Avaliação dos métodos para estimar alturas ao longo do tronco

O teste de Bartlett indicou que as variâncias não são homogêneas para os tratamentos, e mesmo com a aplicação das transformações, as variâncias continuaram heterogêneas. Portanto, foi aplicada a estatística não-paramétrica, utilizando-se o teste de Kruskal-Wallis.

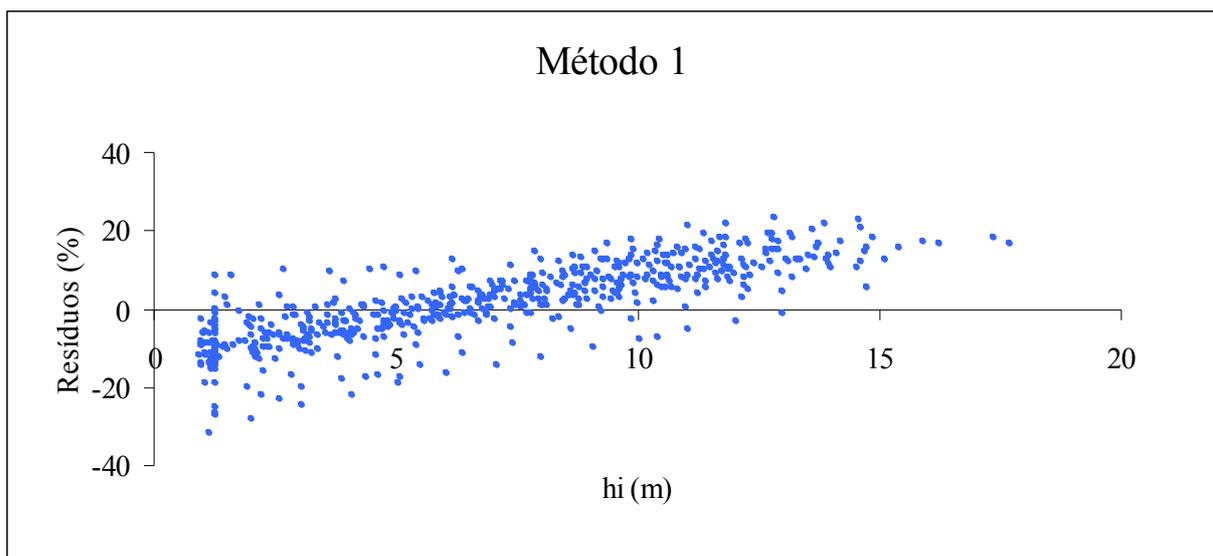
Na Tabela 16, pode-se observar que o  $p$ -valor é maior que 0,05, com 5% de probabilidade ( $\alpha = 0,05$ ). Deste modo, estatisticamente não há diferença significativa entre os tratamentos quanto à variável altura, mostrando que os métodos são iguais entre si.

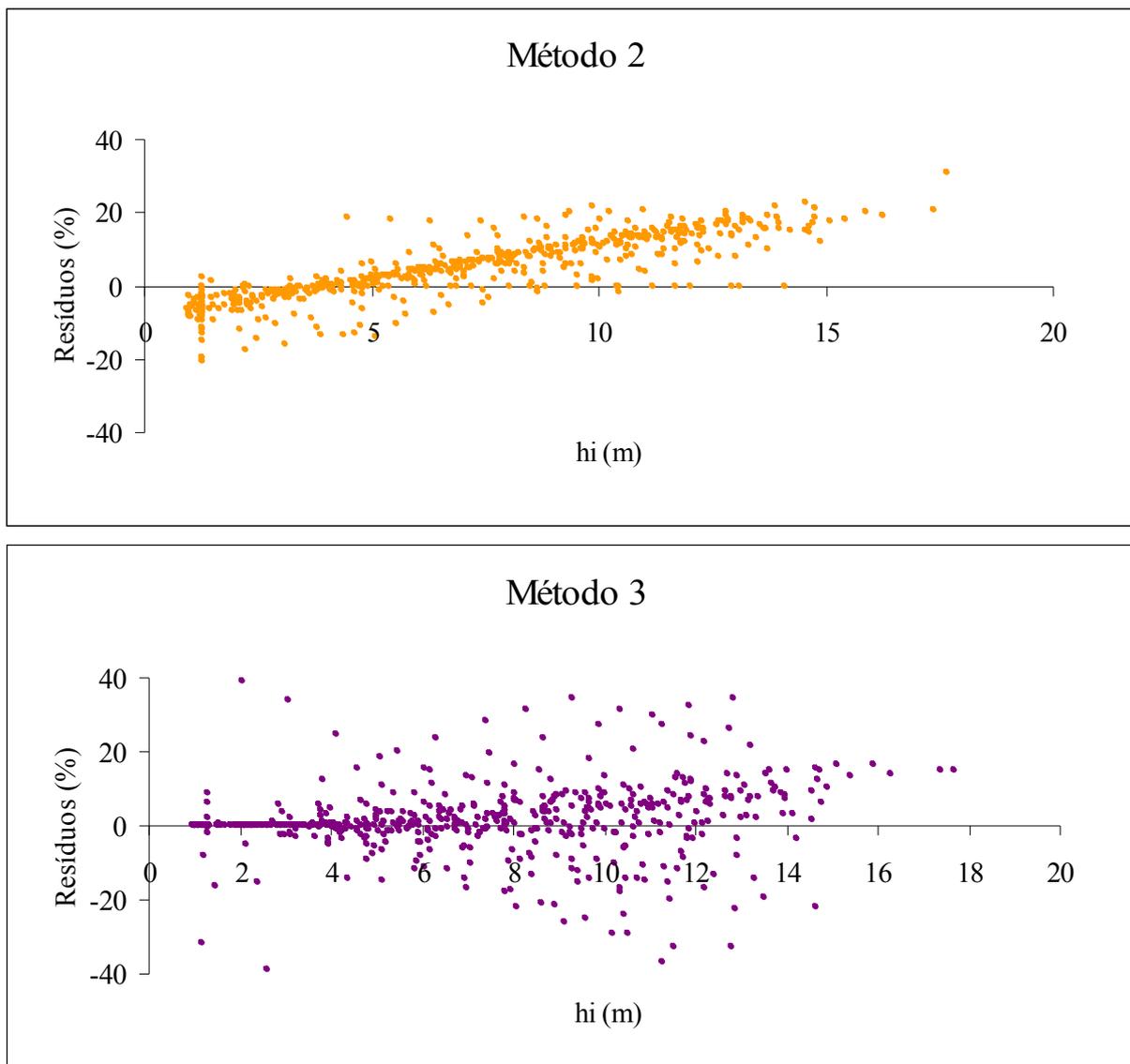
**Tabela 16.** Resultados do  $p$ -valor e estatística do teste de Kruskal-Wallis.

Tratamento	Valor
H	3,66
Grau de Liberdade	3
$p$ -valor	0,30

A análise dos desvios das estimativas, obtidas com os métodos, revelou que os métodos 1 e 2 possuem comportamentos semelhantes quanto à distribuição dos resíduos, e que no método 3 os resíduos são melhor distribuídos ao longo do eixo  $x$ .

Nos métodos 1 e 2, os resíduos mostram superestimativas para as alturas menores e subestimativas para as maiores, ou seja, as estimativas apresentam tendências. Por outro lado, no método 3, os resíduos indicam uma distribuição relativamente homogênea e com a maior parte dos pontos muito próximos de zero ao longo das alturas (Figura 14).





**Figura 14.** Distribuição dos resíduos das alturas acumuladas obtidas pelos três métodos em relação às alturas medidas com a estação total.

#### 5.4. EQUAÇÕES DE VOLUME AJUSTADAS

As estimativas dos diâmetros obtidos em cada método testado e a testemunha foram usadas para ajustar o modelo de Schumacher-Hall a fim de verificar a performance dos dados obtidos para estimar volume total. As estatísticas dos dados volumétricos (obtidos pela fórmula de Smalian) de cada método testado e da testemunha estão na Tabela 17.

**Tabela 17.** Volume total com casca calculado por Smalian a partir dos diâmetros ( $d_i$ ) e alturas ( $h_i$ ) obtidos pelos quatro métodos.

Método	Volume individual total com casca ( $m^3$ )		
	Média	Máximo	Mínimo
T1	1,76	3,02	0,39
T2	1,56	2,85	0,30
T3	1,84	3,70	0,47
T0	1,96	3,65	0,49

Em que: T0 – Volume total com casca a partir dos diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3).

Na Tabela 18 são apresentados os coeficientes estimados para cada tratamento e as respectivas estatísticas de ajustes para o modelo de Schumacher-Hall.

**Tabela 18.** Coeficientes e estatísticas do modelo de Schumacher-Hall para estimar o volume total com casca por tratamento.

Método	$b_0$	$b_1$	$B_2$	$R^2$	Syx%
T1	9,13326	1,99169	0,63327	0,9388	11,5483
T2	9,25375	1,99706	0,68548	0,9546	10,2383
T3	8,06406	1,69414	0,73812	0,8916	14,8826
T0	9,39390	2,02103	0,76446	0,9526	9,8303

Em que: T0 – Volume total com casca obtidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3);  $R^2$  - Coeficiente de Determinação; Syx% - Erro Padrão de Estimativa em porcentagem para o volume total com casca.

É importante salientar, que as estatísticas da Tabela 18 foram calculadas a partir dos diâmetros obtidos em cada tratamento, não se tratando, pois, da mesma base de dados. Observa-se que a partir dos volumes pela cubagem com a suta (T0), obteve-se um bom ajuste ( $R^2 = 0,9526$ ) e um erro médio para estimar o volume total ou comercial com casca de 9,8%, resultados normais para este tipo de equações.

As estatísticas geradas para os três métodos (Tabela 18) não devem ser o foco da análise porque, muito embora os ajustes e erros sejam razoáveis, eles podem apresentar discrepâncias acentuadas em relação à testemunha (diâmetros medidos com a suta), ou seja, é de interesse aqui, saber qual é o erro médio das equações geradas pelos métodos testados em relação aos volumes obtidos com as medições efetivadas com a suta. Desta forma, na Tabela 19 estão os erros médios calculados entre os volumes cubados por Smalian a partir da Suta e os volumes estimados pelas equações ajustadas com diâmetros estimados pelos três métodos testados.

**Tabela 19.** Erro Padrão de Estimativa (Syx%) recalculado para os métodos em função dos volumes cubados com a suta.

<b>Método</b>	<b>Syx%</b>
T1	15,33
T2	18,42
T3	14,31

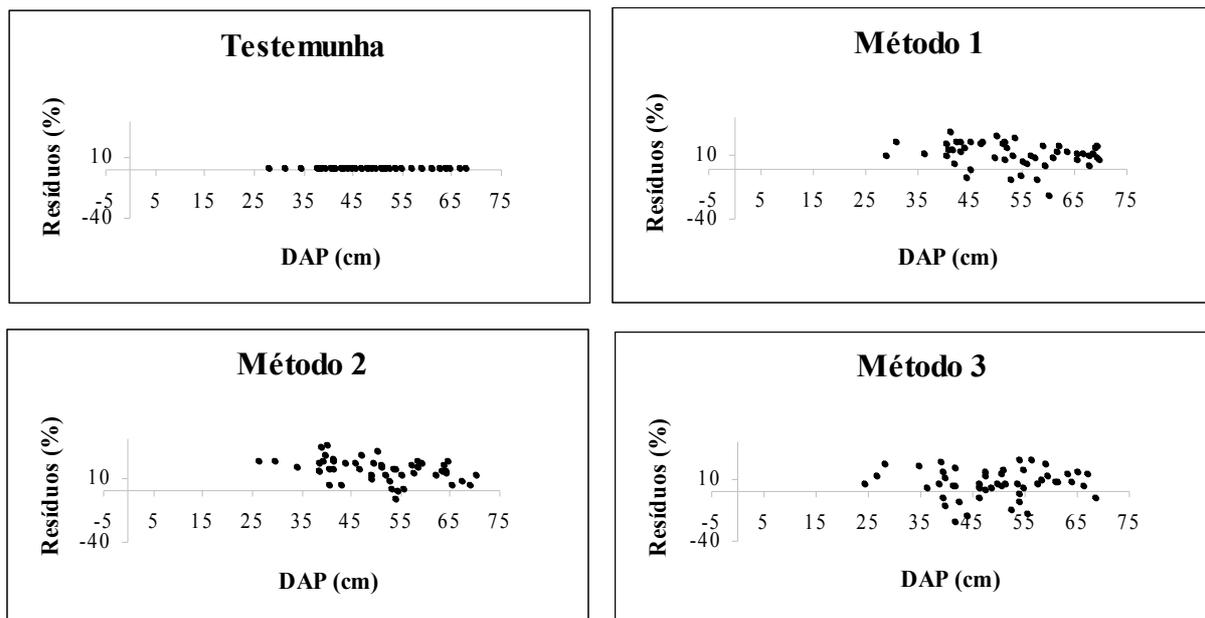
Na tabela 19, pode-se observar que o método T3 apresentou menor erro em relação aos tratamentos T1 e T2. Na tabela 20, têm-se a soma do volume das 50 araucárias amostradas estimada pelo modelo de Schumacher-Hall com os dados da suta e dos três métodos testados. Apresentam-se também os resíduos médios dos métodos testados contra os volumes da testemunha (suta).

**Tabela 20.** Soma do volume da amostra estimada pelo modelo de Schumacher-Hall para os métodos testados e para os diâmetros medidos com a suta e respectivos resíduos médios (%).

<b>Método</b>	<b>Soma do volume estimado</b>	<b>Resíduos médios (%)</b>
	<b>(m<sup>3</sup>)</b>	
T1	88,03	9,86
T2	77,89	20,01
T3	91,89	6,00
T0	97,89	--

Em que: T0 – Volume total com casca obtidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3).

Com o volume total estimado para o *di* e *hi* medidos com a suta e a estação total tem-se no método 3 a menor média residual com 6,00% e para os métodos 1 e 2, 9,86% e 20,01%, respectivamente. Na Figura 15 estão os gráficos de dispersão dos resíduos em função do volume total estimado com as medições realizadas com a suta.



**Figura 15.** Dispersão de resíduos (%) dos tratamentos em relação ao volume total estimado pelos *di* medidos com suta pelo modelo de Schumacher-Hall.

## 5.5. FUNÇÕES DE AFILAMENTO AJUSTADAS

Os resultados do ajustamento do modelo de quinto grau com os diâmetros nas diversas alturas medidos com a Suta (testemunha) e com os três métodos testados estão na Tabela 21.

**Tabela 21.** Coeficientes estimados e estatísticas para o modelo do 5º grau para cada tratamento.

Método	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$R^2$	Syx%
T1	1,0619	-4,9720	14,2246	-16,3368	6,57050	--	0,8779	6,3697
T2	1,0579	-4,7500	13,2136	-14,8670	5,8842	--	0,8991	5,7318
T3	1,0271	-0,3660	--	--	--	--	0,6407	8,7218
T0	1,0386	-0,3973	--	--	--	--	0,8133	5,9992

Em que: T0 – Diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3);  $R^2$  - Coeficiente de Determinação; Syx% - Erro Padrão de Estimativa em porcentagem para os diâmetros ao longo do tronco.

Em geral, o ajuste do modelo do 5º grau testado para os métodos apresentaram Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) inferiores a 0,90 e Erros Padrão da Estimativa (Syx%) entre 5 e 9%, bastante razoáveis mas que não servem de parâmetro para concluir a respeito de suas performances para estimar os diâmetros ao longo do tronco. Isto acontece às estatísticas geradas não têm a mesma base de dados, tendo em vista que, nos ajustes, foram utilizados os

diâmetros ao longo do tronco gerados para cada tratamento. Para esta análise, essas estatísticas foram recalculadas considerando, como comparador, os diâmetros medidos com a suta (Tabela 22), exceto obviamente para o tratamento T0 porque este, no ajuste já empregou os diâmetros medidos com a suta com dados observados.

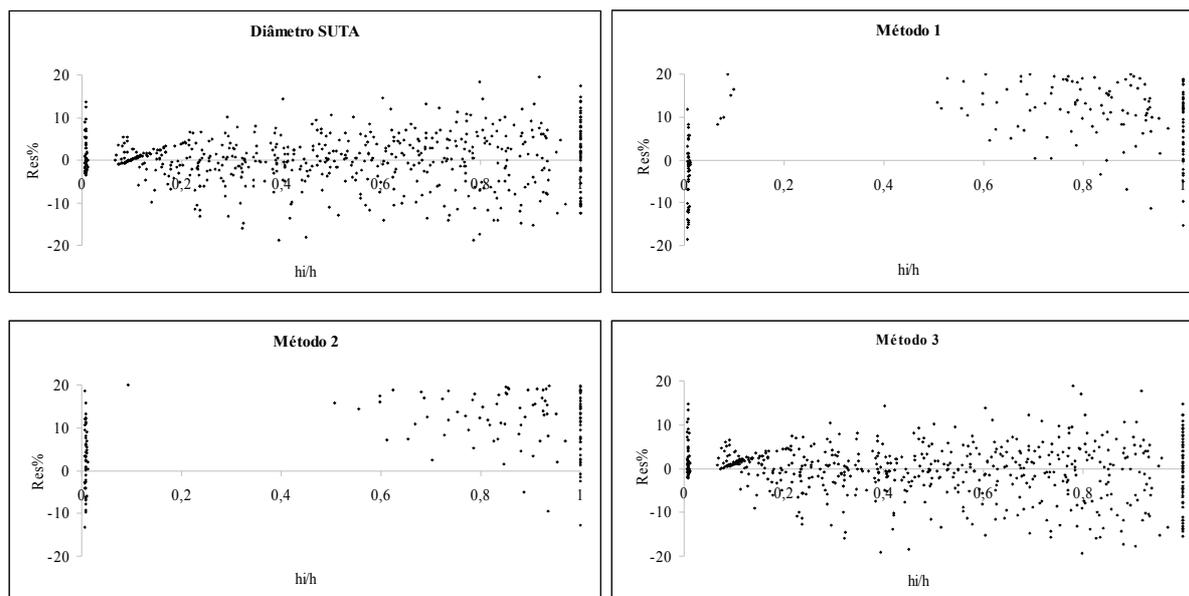
Pode-se constatar então, que os métodos T1 e T2 apresentam erros altos em relação aos tratamentos T0 e T3, os quais têm performances bastante semelhantes, indicando que o método 3 poderia ser utilizado para a cubagem de árvores objetivando ajustes de função de afilamento com resultados similares à cubagem realizada com a suta.

**Tabela 22.** Erro Padrão da Estimativa (Syx%) da função de 5° grau recalculado em relação aos diâmetros medidos com a suta.

Método	Syx%
T1	33,99
T2	36,27
T3	6,77
T0	5,99

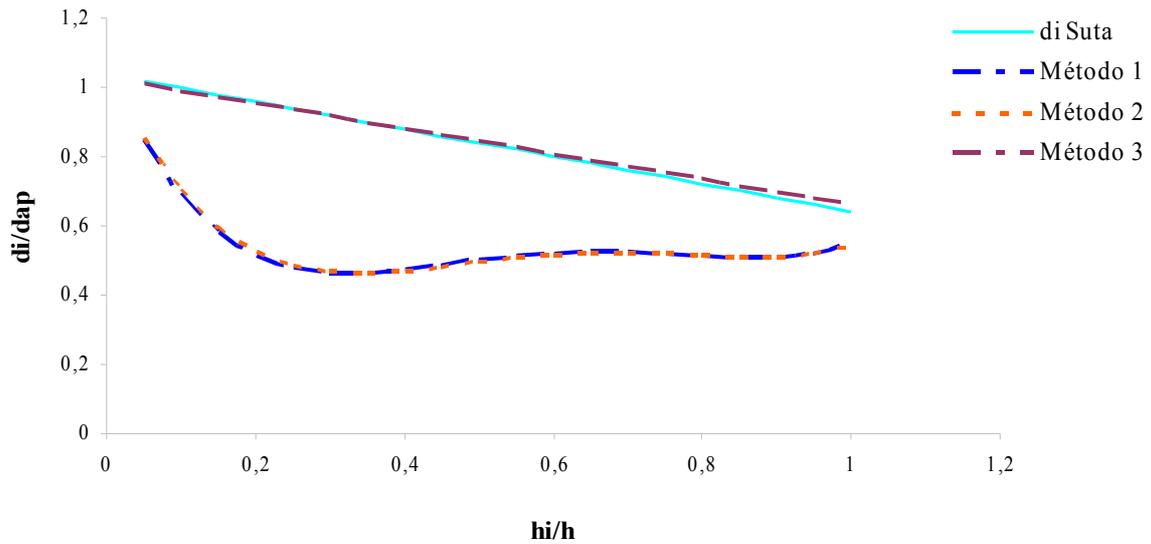
Em que: T0 – Diâmetros medidos com a suta; T1 – Método Escala/Fotografia (Método 1); T2 – Método da Mira Topográfica; (Método 2); T3 – Método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular (Método 3); Syx% - Erro Padrão de Estimativa em porcentagem para os diâmetros ao longo do tronco.

A distribuição dos resíduos (Figuras 16) confirma a boa performance do método 3 e indica claramente que os métodos 1 e 2 não foram apropriados para as medições de diâmetros ao longo do tronco.



**Figura 16.** Distribuição gráfica dos resíduos em porcentagem em função de  $hi/h$  para cada método testado e para os diâmetros medidos com a suta.

Na Figura 17 pode-se verificar o perfil gráfico dos  $d_i$  estimados pela função ajustada para cada método testado e para os diâmetros medidos com a suta, em diferentes alturas. O ajuste da equação de afilamento para o método 3 e para os diâmetros medidos com a suta tiveram perfil longitudinal do tronco iguais, ao contrário dos métodos 1 e 2 que resultam perfis iguais, porém muito diferente do ajuste dos diâmetros medidos com a suta.



**Figura 17.** Afilamento estimado pela função de 5º grau para os métodos testados e para os diâmetros medidos com a suta.

## 6. CONCLUSÕES

- O método de Fotogrametria por uma Imagem-Singular gera diâmetros ao longo do tronco compatíveis com aqueles medidos com a suta em qualquer parte do tronco.
- Até 1/3 da altura total (5,2 m), os três métodos resultaram comportamento similares, ou seja, geram diâmetros estatisticamente iguais com os diâmetros medidos com a suta.
- O método Escala/Fotografia e método da Mira Topográfica, a princípio, não foram considerados adequados para medir diâmetros a diferentes alturas.
- Estatisticamente não há diferença significativa entre os métodos e os resultados medidos com a estação total na estimativa de altura ao longo do tronco.
- A cubagem realizada com o método de Fotogrametria Terrestre com uma Imagem-Singular também apresentou performance adequada para ajustes da equação de volume de Schumacher-Hall e foi mais apropriada do que os demais métodos testados.
- No ajuste das funções de afilamento com os diâmetros estimados pelos métodos testados, o método de Fotogrametria Terrestre com uma Imagem-Singular apresentou também resultados similares com o ajuste realizado com os dados dos diâmetros medidos com a suta.
- Conclui-se, finalmente, que o método de Fotogrametria Terrestre com uma Imagem-Singular pode ser utilizado na cubagem de árvores com resultados bastante próximos daqueles obtidos com a suta.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

Considerando-se os resultados desta pesquisa, recomenda-se a realização de estudo com métodos “Fotogrametria Terrestre com imagens singulares” em outras espécies florestais, tanto em árvores urbanas como em povoamentos florestais, contemplando relevos planos e acidentados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, S.; HOLBERT, D. Uma função para forma de tronco e volume de *Pinus taeda* L. In: **Boletim de pesquisa florestal, unidade regional de pesquisa florestal centro-sul**, EMBRAPA, 03, 1981. p. 37-68.

AHMAD, A. **Digital photogrammetry: An experience of processing aerial photograph of utm acquired using digital camera**. 2006. *Asia GIS Conference*. UTM Skudai, Malaysia. 4-6 March 2006, 11 p.

ALVAREZ, A. A. M.; BRASILEIRO, A.; MORGADO, C. RIBEIRO, R. T. M. **Topografia para arquitetos**. 2003. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/22897625/7/fotogrametria-terrestre> > Acesso 10 de agosto de 2011.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: Ed. SBEE, 1998, 246 p.

ANDRADE, R. R. **Mensurações dendrométricas com câmeras digitais calibradas**. UFPR: Curitiba, 2001. 134p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, 2001.

ANDRADE, R. R. **Fotogrametria dinâmica: determinação fotogramétrica digital de deformações em elementos estruturais da madeira**. UFPR: Curitiba, 2005. 71p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, 2001.

BERTOLA, A. **Uso de fotografias digitais para quantificar o volume sólido de madeira empilhada**. UFV: Viçosa, 2002. 47p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2002.

BRITO, J. L. N.; COELHO, L. C. T. F. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2007, 196 p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2009, 542 p.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e usos da madeira**. Colombo: EMBRAPA/CNPF, 1994. 640 p.

COOPER, M.A.R., ROBSON, S. Theory of close range photogrammetry. In: Close range photogrammetry and machine vision. Whittles Publishing, 1996. 143 p.

COUTO, H. T. Z. BASTOS, N. L. M. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de eucalyptus no estado de São Paulo. **IPEF**, n.37, p.33-44, dez.1987.

COUTO, H. T. Z.; BATISTA, J. L. F.; RODRIGUES, L. C. E. Mensuração e gerenciamento de pequenas florestas. *Documentos florestais*, n. 5, p. 1-37, 1989.

CLARK, N.A.; WYNNR, R.H.; SCHMOLDT, D.L.; ARAMAN, P. A. Use of a non-metric digital camera for tree stem evaluation. Proc. Of the 64th Annual Meeting of the American Soc. For Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, Tampa, Florida. p. 58 – 70. Disponível em: <<http://srs4702.forprod.vt.edu/pubsubj/monitor.htm>> Acesso em: 10 de março de 2010.

DEHN, R., TAUBE D., SLOBODA B., 1985. Schaftvermessung an stehenden Bäumen mit cinema cindimensionalem Paßpunktsystem. *Allg. Forstz.*, 15: 350-353.

DEHN, R., 1987. Eine integrierte rechnergestützte Methode zur Aufstellung lokaler Sortenmodelle am Belspiel der Baumart Fichte. [PhD Thesis.] Univ. Göttingen, Forstwissenschaftl. Fachbereich: 129.

DUTRA, T.L., STRANZ, A. História das Araucariaceae: a contribuição dos fósseis para o entendimento das adaptações modernas da família, com vistas a seu manejo e conversação. In: RONCHI, L.H., WÖHL, O.G. (org) **Tecnologia, Diagnóstico e Planejamento Ambiental**. São Leopoldo: Unissinos. 1. Ed. V.1, p. 293-351. 2003.

FINGER, C. A. G. Fundamentos de biometria florestal. Santa Maria: UFSM/FATEC/CEPEF, 1992, 269 p.

FREITAS, A. G.; WICHERT, M. C. P. **Comparação entre instrumentos tradicionais de medição de diâmetro e altura com o criterion 400**. Piracicaba: INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS, 1998. 7 p.

GAFFREY, D.; SLOBODA, B.; FABRIKA, M.; SMELKO, S. Terrestrial single-image photogrammetry for measuring standing trees, as applied in the Dobroc virgim forest. **Journal of Forest Science**, v. 47, p. 75-87, 2001.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2000, 509 p.

HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Small format digital cameras for mapping applications: Calibration and Stability Analysis. In: **Série em Ciências Geodésicas**. v. 3, Curitiba, 2003. 210 p.

HUMMES, A. P. **Estimativa volumétrica de árvores individuais de *pinus taeda* L. utilizando aerofotos de câmera de pequeno formato digital calibrada**. UFPR: Curitiba, PR, 2002. 52 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, UFPR, PR.

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal - IBDF, 1983. *Inventário Florestal Nacional - florestas nativas, Rio Grande do Sul*. Brasília: Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. 345 p.

LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y.; DAMAS, B.; SANTOS, D. S.; VINHAL, L. A. Obtenção de parâmetros florestais através de laser terrestre – Novas perspectivas. In: **Anais: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. p. 3661-3663, abril de 2007.

LEHMANN, G.; BERNARDO, E. A. **Fotogrametria**. Barcelona: Técnicos Associados, 1975. 399 p.

LOCH, C.; LAPOLLI, E. M. **Elementos básicos da fotogrametria e sua utilização prática**. 4 ed. Florianópolis: UFSC, 1998. 104 p.

LONGHI, J. **A estrutura de uma floresta natural de *Araucária angustifolia* (Bert.) O. Ktze, no sul do Brasil**. UFPR: Curitiba, PR, 1980. 169 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, PR.

KLEIN, R. M. Sugestões e dados ecológicos de algumas árvores nativas próprias a serem empregados no reflorestamento norte e oeste paranaense. In: SIMPÓSIO DE REFLORESTAMENTO DA REGIÃO DA ARAUCÁRIA, 1., Curitiba, 1965. **Anais**. Curitiba: FIEP, 1965, p.157-174.

KOCH, Z.; CORRÊA, M. S. **Araucária: A floresta do Brasil meridional**. Curitiba: Olhar Brasileiro, 2002, 148 p.

MAACK Reinhard. **Geografia Física do Estado do Paraná**. BRDE/ IBPT/ UFPR, Editora Max Roesner, Curitiba, 350 p., 1968.

MACHADO, A. M. L. **Extração automática de contornos de edificações, utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados lidar**. UFPR: Curitiba, PR, 2006. 190 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, PR.

MACHADO, S. A.; CONCEIÇÃO, M. B.; FIGUEIREDO, D. J. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbastes em plantações de *Pinus oocarpa*. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 4, n. 2, p. 185-197, 2002.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Guarapuava: UNICENTRO. 2ª Ed, 2006. 316 p.

MACHADO, L. M. **Araucária: identidade, registro de sua história**. Araucária: Positiva, 2003. 67 p. (Cadernos pedagógicos; 1).

MARCHIORI, J.N.C. **Dendrologia das Gimnospermas**. Santa Maria: Ed. Da Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 161 p.

MITISHITA, E. A.; MACHADO, A. M. **Estabilidade geométrica de uma câmara digital de baixo custo para fins de um “Bundle Adjustment”**: Estudo de caso. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário – Florianópolis, 2006, 11 p.

NTIMA, O.O. **The Araucárias. Fast growing timber tees of the lowland tropics**, n.3. Oxford: Commonwealth Forestry Institute, 1968.139 p.

PATON, S. P. **Estimativas de volumes individuais expressos em metros cúbicos sólido e estéreos, para bracatinga *Mimosa soabvella* Benth. em povoamentos naturais maduros.** UFPR: Curitiba, PR, 1984. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, UFPR, PR.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. **Inventário Florestal.v1**, Curitiba, PR, 1997. 316 p.

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.

REITZ, R.; KLEIN, R. M. **Flora ilustrada catarinense: Araucariáceas.** Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1966. 63 p.

SANTOS, R. T. **Análise da macrot textura de pavimentos através de processamento de imagens, usando Transformada de Fourier.** UNIJUÍ: Ijuí, RS, 2008. 121 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUÍ, RS.

SANTOS, D. Elementos de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. 2010. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/danielsantosufpr/fs-cap-ia5>> Acesso em: 23 de agosto de 2011.

SOBRINO, J. A. S. **Introducción a La fotogrametria.** 2007. Disponível em: <[http://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad6/Introduccion\\_a\\_la\\_Fotogrametria.pdf](http://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad6/Introduccion_a_la_Fotogrametria.pdf)> Acesso em: 10 de setembro de 2011.

SOLIGO, A. J. **Crescimento da *Araucaria angustifolia* regenerada sob *Pinus elliottii* e em povoamento homogêneo interplantado com *Pinus spp.*** UFSM: Santa Maria, 2009. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, RS.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Biometria Florestal: medição e volumetria de árvores.** Textos técnicos. UFLA. Lavras. 1998. 310 p.

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

TOMMASELLI, A. M. G.; SILVA, J. F. C.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; DAL POZ, A. **Fotogrametria: aplicações a curta distância.** In: MENEGUETE Jr, M.; ALVES, N. (Organizadores). Presidente Prudente SP, p. 147-159, 1999.

ZANON, M. L. B. **Crescimento da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze diferenciado por dioicéia.** UFSM: Santa Maria, RS, 2007. 109 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, RS.

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.

WEHR, N. J.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, através da microdensitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, n.58, p.161-170, 2000.

WOLF, Paul R. **Elements of photogrammetry: with air photo interpretation and remote sensing**. 2nd ed. Auckland: McGraw-Hill, c1983. 628 p.(broch.).

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS**. U.S.A, 2000, 607 p.