

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE INFORMÁTICA

RAFAEL TOMAZ PARREIRA

**MÉTODO AUTOMÁTICO DE
MEDIÇÃO DE DIÂMETROS DA
BASE DE EUCALIPTOS:
UMA ABORDAGEM COM CÂMERAS DE
PROFUNDIDADE**

Goiânia
2015

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	Rafael Tomaz Parreira				
E-mail:	rafaeltp3@gmail.com				
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? ☒ Sim ☐ Não					
Vínculo empregatício do autor	Estudante				
Agência de fomento:	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior			Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	DF	CNPJ:	00889834/0001-08
Título:	Método Automático de Medição de Diâmetros da Base de Eucaliptos: Uma Abordagem com câmeras de profundidade				
Palavras-chave:	Câmera de profundidade, Inventário florestal, Clones de eucaliptos, Microsoft Kinect, estimativas de diâmetros				
Título em outra língua:	Measuring Method of Automated Diameter of Eucaliptos				
Base:	An approach with depth câmeras				
Palavras-chave em outra língua:	Depth camera, forest inventory, eucalyptus clones, Microsoft Kinect, estimates diameters				
Área de concentração:	Ciência da Computação				
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	29/10/2015				
Programa de Pós-Graduação:	Em Ciência da Computação				
Orientador (a):	Fabrizzio Alphonsus Alves de Melo Nunes Soares				
E-mail:	fabrizzio@inf.ufg.br				

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do (a) autor (a)

Data: ____ / ____ / ____

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

RAFAEL TOMAZ PARREIRA

**MÉTODO AUTOMÁTICO DE
MEDIÇÃO DE DIÂMETROS DA
BASE DE EUCALIPTOS:
UMA ABORDAGEM COM CÂMERAS DE
PROFUNDIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação.

Área de concentração: Ciência da Computação.

Orientador: Prof. FABRIZIO ALPHONSUS ALVES DE MELO NUNES SOARES

Goiânia
2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Parreira, Rafael Tomaz

MÉTODO AUTOMÁTICO DE MEDIÇÃO DE DIÂMETROS DA BASE DE
EUCALIPTOS: [manuscrito] : UMA ABORDAGEM COM CÂMERAS DE
PROFUNDIDADE / Rafael Tomaz Parreira. - 2015.

lxxx, 80 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Fabrizzio Alphonsus Alves de Melo Nunes
Soares.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de
Informática (INF) , Programa de Pós-Graduação em Ciência da
Computação, Goiânia, 2015.

Bibliografia.

Inclui algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Câmera de profundidade. 2. Inventário florestal. 3. Clones de
eucaliptos. 4. Microsoft Kinect. 5. Estimativas de diâmetros. I. Soares,
Fabrizzio Alphonsus Alves de Melo Nunes, orient. II. Título.

Rafael Tomaz Parreira

**Método Automático de Medição de Diâmetros da Base de
Eucaliptos: Uma abordagem com câmeras de profundidade**

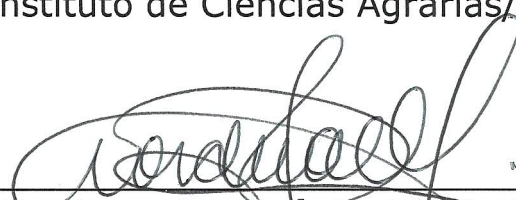
Dissertação defendida no Programa de Pós-Graduação
do Instituto de Informática da Universidade Federal de
Goiás como requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Ciência da Computação, aprovada em 29
de outubro de 2015, pela Banca Examinadora
constituída pelos professores:



Prof. Dr. Fabrízio Alphonsus Alves de Melo Nunes Soares
Instituto de Informática - UFG
Presidente da Banca



Prof. Dr. Christian Dias Cabacinha
Instituto de Ciências Agrárias/UFMG



Prof. Dr. Leandro Luís Galdino de Oliveira
Instituto de Informática - UFG

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador(a).

Rafael Tomaz Parreira

Graduou-se em Bacharelado em Ciência da Computação na UFG - Universidade Federal de Goiás. Durante sua graduação, foi pesquisador do CNPq em um trabalho de iniciação científica. Desenvolveu trabalhos na área de Cálculos Numéricos em uma abordagem dos métodos de Newton e Realidade Virtual aplicada no ensino de ciências exatas. Atualmente desenvolve soluções para problemas de Visão Computacional relacionados a Ciências Florestais.

Dedico este trabalho à meus pais que me deu todo apoio e condições para seu desenvolvimento.

Quando comecei o mestrado me deram todo suporte para que eu pudesse mudar de cidade, sei que fizeram um esforço enorme para que fosse possível, e mesmo que estivesse com problemas me apoiaram sempre, não deixaram que perdesse meus objetivos.

Em certos momentos algumas adversidades, doenças e problemas apareceram em nossa família, mas com ajuda de meus pais foi possível retomar meu foco e continuar me guiando por meus objetivos.

O desejo que tenho é sempre poder estudar, e outro deles é me tornar mestre.

Lembro bem que diversas vezes minha mãe falava em tentar fazer mestrado, mas esse desejo era sempre colocado de lado e sua prioridade era trabalhar, para poder dar o melhor possível para mim e meus irmãos. Apesar de hoje ela não falar mais sobre isso, o meu desejo é que ela ainda possa fazer. E se eu me tornar mestre, é pelo incentivo que minha mãe sempre me deu.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, à meus pais pela dedicação e por ter me proporcionado tudo que precisei, à meu orientador, professor Fabrízio, por acreditar em mim, me dar a oportunidade de ser seu aluno, pela paciência e atenção, ao professor Christian Cabacinha pela grande ajuda que proporcionou para concluir esta pesquisa, à Karolline Malaquias que esteve sempre ao meu lado com seu apoio, sua paciência e seu carinho, aos grandes amigos Thyago Peres Carvalho, Matheus Diedrich Ullmann e Weder Cabral Mendes que ajudaram mesmo que indiretamente no desenvolvimento deste trabalho e a todos aqueles que ajudaram de forma direta ou indireta. Agradeço também a Fapeg (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás), pelo financiamento de desta pesquisa, com recursos do projeto Desenvolvimento de técnicas computacionais para inventário florestal, contemplado com edital n. 5 - chamado universal de 2012.

"A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein,

.

Resumo

Parreira, Rafael Tomaz. **MÉTODO AUTOMÁTICO DE MEDIÇÃO DE DIÂMETROS DA BASE DE EUCALIPTOS**. Goiânia, 2015. 79p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

O inventário florestal é um conjunto de técnicas importantes que fornece informações essenciais para direcionamento racional e sustentável dos recursos disponíveis nas florestas. Por meio dele é possível a caracterização de uma determinada área e do conhecimento quantitativo e qualitativo das espécies que a compõe. Inventários florestais são utilizados em vários tipos de levantamentos com a finalidade de reconhecimento, diagnóstico e avaliações no campo florestal. A avaliação de estoque de madeira em estudos de viabilidade, planejamento e preparação de talhões de exploração, bem como, diagnóstico pós-exploratório, exigem inventários específicos. Uma das informações essenciais é o diâmetro ao longo do tronco das árvores, que é imprescindível para o cálculo de volume de madeira. Atualmente, para medir esses diâmetros é demandado um período elevado de tempo, sendo passível de erros gerados por defeitos em instrumentos e/ou falhas dos operadores. Alguns estudos têm utilizado técnicas diferentes para substituir o uso de instrumentos tradicionais na tomada das medidas dos diâmetros, entre elas se destaca o uso de dispositivos que podem obter os padrões de profundidade em cenários que contém árvores. Entre os dispositivos capazes de obter profundidade, está as câmeras de profundidade, que vem se popularizando, tornando-se cada vez mais acessíveis, com isso diversas aplicações de visão computacional vêm sendo desenvolvidas, e são capazes de fazer a extração de informações bastante úteis. Este trabalho propõe a utilização de câmeras de profundidade para realizar análise e aquisição de dados que são usados para estimar diâmetros de árvores do gênero *Eucalyptus*. O modelo desenvolvido para calcular os diâmetros da base das árvores nas alturas de 0,3; 0,7 e 1,3 metros em relação ao solo. O modelo proposto, tem por objetivo, o uso dos diâmetros estimados por câmera de profundidade para o cálculo do volume das árvores de eucalipto a partir método apresentado nos trabalhos relacionados. Foram realizados testes a fim de comparar o desempenho do modelo proposto aos métodos tradicionais. Os resultados obtidos foram considerados bastante satisfatórios.

Palavras-chave

Câmera de profundidade, Inventário florestal, Clones de eucaliptos, Microsoft Kinect, estimativas de diâmetros

Abstract

Parreira, Rafael Tomaz. **MEASURING METHOD OF AUTOMATED DIAMETER OF EUCALIPTOS BASE:**. Goiânia, 2015. 79p. MSc. Dissertation. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

Forest Inventory is a set of important techniques that provides essential informations for rational and sustainable resources driving in forests. The selected area can be characterized about species quantity and quality. Forest inventories are used in many kind of studies in order of knowing, forecasting and evaluation in fields. Furthermore, the forest inventory also allows to evaluate the timber stock and its viability, planning and preparation of exploration tree stands and post exploratory. An essential information is the diameters along of tree trunk and it is indispensable for timber volume calculation. Currently, for diameter measuring a huge time is required and many mistakes are possible due instruments defects and human failures. Some studies have used different techniques for replacing traditional diameter measuring instruments, among them stands out devices with capability of get depth data in the field. Among these devices are the depth cameras that due the recent decrease of price have become very popular in computer vision applications. In order to assist volume estimation, this works proposes using depth cameras to conduct data acquisition and analisys of Eucalyptus tree diameters. The model developed is capable to acquire diameters in different tree heights, however the focus is more specifically in get diameters at 0.3, 0.7 and 1.3 meters from the ground. Experiments were conducted in order to compare the proposed model to traditional techniques and the results are very satisfactory.

Keywords

Depth camera, forest inventory, eucalyptus clones, Microsoft Kinect, estimates diameters

Sumário

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
Lista de Algoritmos	14
1 Introdução	15
2 Inventário Florestal	19
2.1 Introdução	19
2.2 O Eucalipto e os Povoamentos Clonais	20
2.3 Dendrometria	22
2.4 Estimativa de Volumes	24
2.5 Predição recursiva de diâmetros de clones de eucalipto utilizando rede percep- tron de múltiplas camadas para o cálculo De volume	27
2.6 <i>Accuracy and efficiency of the Laser-camera</i>	28
2.7 <i>Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique - A proof of concept</i>	29
2.8 <i>Diameter Measurements of the Upper Parts of Trees Using an Ultra-Telephoto Digital Photography System</i>	31
2.9 <i>Comparison of different Laser-based methods to measure stem diameter</i>	32
2.10 Considerações Finais Deste Capítulo	34
3 Técnicas de Geometria tridimensional em Visão Computacional	35
3.1 Introdução	35
3.2 Sensores de Profundidade	36
3.2.1 Câmeras Estereoscópicas	38
3.2.2 Escâneres de triangulação a laser	38
3.2.3 Câmeras de tempo de voo	38
3.2.4 Escâneres holográficos	39
3.2.5 Câmeras de luz estruturada	39
Microsoft Kinect	40
3.3 <i>V-Disparity</i>	42
3.4 Considerações Finais Deste Capítulo	45
4 Modelo de Medição Automatizado de Diâmetros de Árvores	46
4.1 Introdução	46
4.2 Captura da imagem de profundidade	47
4.3 Tratamento da imagem de profundidade	49

4.4	Segmentação do fuste	54
4.5	Reta de inclinação do fuste	56
4.6	Localizando as alturas de interesse	58
4.7	Calculando os diâmetros	59
4.8	Verificação das funcionalidades da aplicação	60
4.9	Cálculo dos erros dos diâmetros estimados	61
4.9.1	Cálculos dos volumes das árvores a partir dos diâmetros estimados e utilizando as equações volumétricas	62
4.10	Considerações Finais Deste Capítulo	63
5	Resultados Obtidos	64
5.1	Introdução	64
5.2	Dados	64
5.3	Comparação entre os diâmetros das árvores calculados utilizando suta e os estimados pelo modelo proposto	65
5.4	Comparação entre os volumes das árvores calculados utilizando os diâmetros medidos com suta e os estimados pelo modelo proposto	70
5.5	Considerações Finais Deste Capítulo	71
6	Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros	72
6.1	Introdução	72
6.2	Conclusões e Contribuições	72
6.3	Trabalhos Futuros	73
	Referências Bibliográficas	75

Lista de Figuras

2.1	Suta dendrométrica.	23
2.2	Esquema de seções ao longo de um fuste (SILVA; NETO, 1979).	26
(a)	Posições de medição, para obtenção da área seccional de acordo com a equação de Smalian	26
(b)	Posições de medição, para obtenção da área seccional de acordo com a equação de Huber	26
(c)	Posições de medição, para obtenção da área seccional de acordo com a equação de Newton	26
2.3	Laser-câmara e seu princípio de medição de diâmetro (MELKAS et al., 2008).	28
(a)	Laser-câmara	28
(b)	Princípio de medição de diâmetro	28
2.4	Conceito do SfM-MVS (MORGENROTH; GOMEZ, 2014).	30
(a)	Exemplo de foto tirada para reconstruir o modelo.	30
(b)	Imagem total da cena.	30
(c)	Diferentes posições de onde foram tiradas fotografias para SfM.	30
(d)	Modelo 3D texturizada produzido por SfM-MVS	30
2.5	Sistema desenvolvido usando a câmera digital e lente teleobjetiva (SHI-MIZU et al., 2014).	31
2.6	Esquema para medir o diâmetro com TLS (VASTARANTA et al., 2008).	33
3.1	Estrutura sequencial de um sistema de visão computacional (LULIO, 2011).	35
3.2	Exemplo de imagem de profundidade (NETO, 2014).	37
3.3	Câmara de luz estruturada Microsoft Kinect (ZHANG, 2012).	40
3.4	Distribuição dos sensores e atuadores do Microsoft Kinect (LABELLE, 2011).	41
3.5	Esquema da Placa Prime Sense PS1080 (EL-LAITHY; HUANG; YEH, 2012).	42
3.6	Princípio do <i>v-disparity</i> (ZHAO; KATUPITIYA; WARD, 2007).	43
(a)	Par de imagens de uma câmera estéreo.	43
(b)	Imagem de disparidade resultante.	43
(c)	Imagem <i>v-disparity</i> .	43
3.7	Exemplo de linha obtida com a transformada de Hough (ZHAO; KATUPITIYA; WARD, 2007).	44
4.1	Esquema de obtenção dos diâmetros da árvore.	46
4.2	Bateria utilizada no sistema.	48
4.3	Interface gráfica do protótipo.	48
4.4	Exemplo de imagens de uma cena.	49
(a)	Perspetiva de visão da cena obtida pelo Microsoft Kinect.	49
(b)	Visualização do mapa de profundidade em RGB.	49

4.5	Imagem de profundidade com falhas.	50
4.6	Esquema que expressa o uso da moda nas imagens.	50
4.7	Diagrama geral de atividades para detecção do solo	51
4.8	Imagem <i>v-disparity</i>	52
4.9	Imagem <i>v-disparity</i> com linha representando o plano do solo	53
4.10	Exemplo de mapa de profundidade de uma árvore depois de passar pelo processo de tratamento descrito.	54
4.11	Esquema de análise de vizinhança 8.	55
4.12	Exemplo de mapa de profundidade de uma árvore após rotulação.	56
4.13	Reta de inclinação de uma amostra visualizada em um exemplo de imagem de profundidade.	58
4.14	Exemplo de restas das alturas de interesse.	59
5.1	Diagrama dos diâmetros medidos com suta por erros da diferença entre diâmetro medido e estimado.	66
5.2	Diagrama de dispersão de todos os diâmetros.	68
5.3	Imagens obtidas na segunda árvore.	69
(a)	Imagem RGB	69
(b)	Mapa de profundidade	69

Lista de Tabelas

5.1	Classes de diâmetro das árvores amostras	65
5.2	RMSE% por Classe	67
5.3	Correlação linear por classe	67
5.4	Diferença absoluta (%) entre os volumes por classe	70

Lista de Algoritmos

4.1 *Rotulao*(A, n, m)

55

Introdução

O Brasil possui uma extensa cobertura de florestas plantadas, e este setor envolve uma grande cadeia produtiva que inclui desde o cultivo até produtos industrializados, sendo a silvicultura uma importante atividade econômica no país. Este fator denota a grande capacidade de geração de emprego e renda no setor. Em 2012, o valor bruto da produção (VBP) obtido pelo setor totalizou R\$ 56,3 bilhões, indicador 4,6% superior ao de 2011. Os tributos arrecadados corresponderam a R\$ 7,6 bilhões (0,5% da arrecadação nacional). O saldo da balança comercial da indústria nacional de base florestal ficou em US\$ 5,5 bilhões). No âmbito social, as atividades da cadeia produtiva do setor contribuíram para a geração de 4,4 milhões de empregos. A cobertura florestal do território brasileiro, combinada com o excelente solo e condições climáticas, indicam as grandes vantagens da silvicultura no Brasil e tornando-o o quarto país em menor relação custo por produção (JUVENAL; MATTOS, 2002; ABRAF, 2013).

Cerca de 5,1 milhões de hectares, correspondente a 71% de florestas plantadas no Brasil são do gênero *Eucalyptus* (ABRAF, 2013). Grandes investimentos pelas indústrias de papel e celulose, combinados com os esforços de instituições de pesquisa e universidades, fizeram deste país um dos maiores produtores de eucalipto do mundo.

O eucalipto é uma espécie de rápido crescimento, de baixo custo, que produz mais madeira do que outras espécies. O rendimento da madeira no Brasil, em 2012, foi de $40,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. No Chile, EUA, Canadá e Finlândia, o rendimento é de 20, 10, 7 e, $4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, respectivamente (VCP, 2004; ABRAF, 2013).

O volume de madeira em um plantio é uma informação importante para orientar a utilização racional e sustentável dos recursos florestais disponíveis. Assim, é muito importante quantificá-lo de forma tão precisa quanto possível, sendo necessárias várias amostras, a fim de que seja uma porção representativa das florestas que vão ser medidas. O método mais tradicional utilizado por empresas madeireiras brasileiras é o uso de equações volumétricas. Na estimativa do volume, essas equações são definidas com amostras de árvores na condução da inventário florestal.

Nas equações volumétricas, são feitas suposições da geometria da forma da árvore. Tais suposições requerem várias medidas de diâmetros ao longo do fuste para

a construção de modelos que representem as árvores. Ao realizar o inventário florestal para o levantamento desses dados, podem ocorrer vários erros. Um erro de um metro na medição da altura total da árvore (H_t) corresponde a aproximadamente 14% do volume cilíndrico da árvore. Considerando um erro de um cm do diâmetro medido a 1,3 m do solo (DAP, diâmetro à altura do peito) corresponde a um erro de aproximadamente 19% do volume total da árvore. Todos os segmentos da população devem ser amostrados e essa tarefa torna-se muito demorada e dispendiosa. Consequentemente, os operadores, muitas vezes, ignoram dados de cubagem de floresta, o que prejudica as previsões geradas por equações volumétricas (ANDRADE; CALEGARIO; SCOLFORO, 2006).

Instrumentos de medição com defeitos e erros cometidos pelos profissionais que os operam pode levar a erros de medição de altura e diâmetro. As medidas são tomadas diretamente da árvore, usando uma suta ou instrumento similar. Devido ao tamanho das árvores, a altura total da árvore é indiretamente medida. Em medições indiretas, os instrumentos são usados para ver a base e o topo das árvores, e princípios geométricos ou trigonométricos são aplicados para calcular a altura.

A fim de que o operador seja capaz de medir a altura total da árvore, é necessário que a parte superior e a parte inferior sejam visíveis. No entanto, a densidade da copa, solo ou ângulo da árvore e movimento do fuste causado pelo vento pode obstruir a visão. Medições de diâmetro abaixo de 1,3 m (altura do DAP) podem ser tomadas com a árvore em pé. Para fazer medições acima do DAP, escadas ou andaimes podem ser necessários, se as alturas ainda estão em alcance. No entanto, para grandes alturas, equipamento de escalada especial e um operador qualificado são necessários. Para simplificar as medições acima do DAP, a árvore pode ser derrubada, para que diâmetros e altura total possam ser medidos. No entanto, este método é destrutivo porque a madeira deve ser vendida em curto prazo e bastante oneroso (THOMAS et al., 2006). Isso impede que os dados coletados possam auxiliar na tomada de decisão de médio e longo prazo. Por essas razões, muitas vezes são medidos os diâmetro acima do DAP com instrumentos especiais que precisam que se tenha visão do fuste e devem ser posicionados distantes da árvore.

Métodos utilizados para estimar o volume de madeira foram propostas por Smalian, Huber e Newton, que podem ser aplicados e também fazem o uso do diâmetros. Esses métodos têm sido aplicados no setor florestal desde o final do século XVIII para calcular o volume total da árvore (SCOLFORO, 2005).

Muitos pesquisadores têm utilizado diversas técnicas para auxiliar tanto na coleta de dados como na predição, para facilitar e ou evitar erros na predição. Xião, Carande e Ghiglia (1998), Sun et al. (2007), Silva et al. (2008), previram a altura da árvore com base no DAP, idade e outras informações estatísticas, utilizando redes neurais artificiais. Diamantopoulou (2006) estimou o diâmetro do fuste utilizando redes neurais artificiais. O diâmetro da base, o diâmetro à altura do peito e altura total da árvore foram usados

como entrada. A saída da rede era todos os diâmetros entre 5,3 e 33,3 cm, a intervalos de 4 m. Nestes estudos, DAP e a altura total foram usados como entrada. A desvantagem destes estudos é que as árvores com o mesmo DAP e altura total, mas com diferentes características cônicas, resultou em volumes iguais.

Uma abordagem foi proposta por Soares (2012), para prever os diâmetros das árvores de eucalipto, utilizando Rede Neural Perceptron Multicamadas. Foi proposta uma previsão recursiva desses diâmetros, levando em consideração apenas as medidas de diâmetros em três alturas diferentes da base de cada árvore até o DAP. Os diâmetros preditos permitiram calcular o volume das árvore através do método de Smalian.

A abordagens propostas por Diamantopoulou (2006), Soares (2012) estimam os valores dos diâmetros com base em algumas medidas já conhecidas, o que não soluciona problemas que envolvem erros na medição por falha dos profissionais e ou defeitos nos instrumentos de medidas. Melkas et al. (2008), Morgenroth e Gomez (2014), Shimizu et al. (2014), Vastaranta et al. (2008) utilizaram técnicas variadas e baseadas em informações tridimensionais de árvores de outras espécies para estimar os diâmetros.

Com base nesses problemas, este trabalho tem como proposta um modelo com base geométrica para obtenção dos diâmetros da base de árvores eucalipto, utilizando informações tridimensionais a partir de imagens capturadas com câmeras de profundidade. Sendo os diâmetros da base o dado de entrada necessário para estimar os demais conforme Soares (2012). Com base nessa perspectiva foram traçados os objetivos:

- Construção de protótipo para extração dos diâmetros da base de árvores de eucalipto com imagens de profundidade.
- Construir uma base de dados de informações dos diâmetros da base da árvore de eucalipto obtidos pelo protótipo e pela coleta manual em uma floresta plantada.
- Fazer um estudo comparativo das informações da base de dados construída.

Os dados utilizados neste estudo foram levantados em um plantio localizado no município de Turmalina, no estado de Minas Gerais, Brasil. Foram usados dados de um sítio florestal com uma amostra de 24 árvores, de um híbrido do gênero *Eucalyptus*, obtidas de um mesmo material genético clonal.

O desempenho dos modelos foi avaliado fazendo-se comparações com as abordagens tradicionais para medição de diâmetros, utilizando suta. Neste caso, foram utilizadas alguns índices para a comparação do desempenho do modelo, tais como, a raiz do erro quadrático médio, o viés (*Bias*) e a correlação linear.

Este modelo permite a extração de dados que podem ser utilizados em conjunto com técnicas de predição de diâmetros como proposto por Soares (2012), o que nos permite estimar estes volumes, considerando apenas três medidas simples. A presente abordagem complementa as técnicas já existentes na área de inventário florestal, permitindo

uma construção de um modelo que passa da coleta de dados, estimativa de informações e predição do volume final, fechando todo o ciclo envolvido no processo.

Este trabalho foi estruturado em capítulos, e neste são apresentadas a introdução, a descrição geral do problema, a sua motivação e os objetivos deste trabalho. O capítulo 2 descreve a atividade do inventário florestal, a dendrometria e trabalhos relacionados. O capítulo 3 aborda um estudo de dispositivos e técnicas utilizando imagens tridimensionais. O capítulo 4 apresenta o modelo proposto neste trabalho, métodos de avaliação do desempenho do modelo. O capítulo 5 apresenta a descrição dos dados coletados em experimentos, os resultados dos experimentos realizados e a comparação entre o modelo proposto e métodos tradicionais da engenharia florestal. O capítulo 6 apresenta as conclusões, as contribuições e os trabalhos futuros que poderão ser realizados.

Inventário Florestal

2.1 Introdução

O inventário florestal tem como principal objetivo determinar o volume de madeira em uma determinada área ou grupo de árvores. Porém, com diversos avanços tecnológicos, outros dados além do volume de madeira se tornaram imprescindíveis aos projetos de manejo florestal. Contudo, o inventário florestal pode ser definido como um conjunto de técnicas de coleta de dados florestais de uma área, a fim de obter informações quantitativas e qualitativas para planejamento do uso dos recursos florestais.

Por causa do alto custo envolvido, é impraticável medir todas as árvores dentro de um povoamento florestal. O inventário florestal depende fortemente dos procedimentos de amostragem para obter informação quantitativa sobre os recursos a um custo razoável. Uma amostra é definida como o subconjunto de medições reais dentro de uma dada população, sendo uma amostra aleatória, se cada unidade de amostragem tem a mesma chance de serem incluídos na amostra (LAAR; AKCA, 2007).

Inventários florestais são utilizados em vários tipos de levantamentos com a finalidade de reconhecimento, diagnóstico e avaliações no campo florestal. A avaliação de estoque de madeira em estudos de viabilidade, planejamento e preparação de talhões de exploração, bem como diagnósticos pós-exploratórios, exigem inventários específicos. Os inventários florestais são instrumentos básicos utilizados para avaliar estatisticamente as reais potencialidades e as capacidades produtivas dos recursos florestais de determinada área.

É uma importante ferramenta utilizada no diagnóstico do potencial produtivo ou protetivo das florestas. É por meio dos resultados dos inventários florestais que se apoiam as decisões importantes a respeito da viabilidade de empreendimentos florestais, que exigem investimentos de alguns milhões de dólares. Os objetivos do inventário são estabelecidos de acordo com a utilização da área, que pode ser área de recreação, reserva florestal, área de manutenção da vida silvestre, área de reflorestamento comercial, entre outros (BONETES, 2003).

No caso das florestas com fins madeireiros, por exemplo, o inventário florestal visa principalmente a determinação ou a estimativa de variáveis como biomassa, área basal, volume, qualidade do fuste, estado fitossanitário, classe de copa e potencial de crescimento da espécie florestal. Nos levantamentos florestais, é prática usual selecionar uma ou mais amostras que consiste em pequenas frações da população de que se deseja obter a informação. O verdadeiro valor de uma característica ou variável é denominado parâmetro e só existe na natureza (HOSOKAWA; SOUZA, 1987). Entretanto, por meio da observação de um certo número de unidades amostrais, pode-se estimar sua estatística correspondente.

Quaisquer estimativas dos parâmetros estão sujeitas a erros de amostragem, oriundos de procedimentos de seleção e operação das unidades amostrais. Em florestas tropicais, por exemplo, onde existe alta heterogeneidade de espécies e tipos florestais, os critérios de seleção das amostras é decisivo em termos de consistência e precisão dos resultados. Na maioria das situações, é necessário estratificar os ambientes de trabalho por categoria tipológica, ecossistema predominante e topografia (BONETES, 2003).

Os inventários florestais devem ser executados periodicamente, para permitir ao proprietário ou ao gerente florestal a planificação das atividades em função das mudanças ocorridas em determinados períodos de tempo considerado. Avaliar o crescimento, as mudanças ocorridas após a exploração florestal, planejar a produção e os tratamentos silviculturais visando o equilíbrio e a recuperação das florestas, exigem trabalhos de campo com inventários florestais (BRANDELERO et al., 2008).

Neste capítulo buscou-se realizar uma revisão de literatura sobre os temas: inventário florestal; o eucalipto (espécie); dendrometria; propostas de medição de diâmetros e estimação de volume para subsidiar a discussão dos resultados e conclusões desta pesquisa.

2.2 O Eucalipto e os Povoamentos Clonais

O Eucalipto é a designação popular das várias espécies vegetais do gênero *Eucalyptus*. Este nome é usado também para outros gêneros da família *Myrtaceae*, nomeadamente dos gêneros *Corymbia* e *Angophora* (SOARES, 2012). Originário da Austrália, o gênero *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae*. Esse gênero teve seu plantio intensificado no Brasil no início do século XX. Ele foi implantado no Brasil em 1909 pelo engenheiro agrônomo Edmundo Navarro de Andrade, então funcionário da Companhia Paulista de Estradas de Ferro (CPEF) (FREITAG, 2007). O *Eucalyptus* foi usado durante algum tempo como dormentes nas ferrovias, lenha para as marias-fumaça e mais tarde como poste para a edificação de linhas de transmissão. Ao final dos anos 20, começou a

ser aproveitado como carvão vegetal, passando a ser utilizado nas siderúrgicas mineiras na fabricação de ferro.

O eucalipto é, atualmente, a espécie florestal mais plantada no mundo, com mais de 17,8 milhões de hectares. Dentre os países com maiores áreas reflorestadas, destacam-se a Índia, com 8 milhões de hectares, seguida pelo Brasil, com cerca de 5,1 milhões de hectares plantados. A eucaliptocultura no Brasil é intensiva, com elevada produtividade média da ordem de $40,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ (ABRAF, 2013), e está baseada, principalmente, em florestas clonais (ALFENAS et al., 2004).

Atualmente, verifica-se uma tendência de troca de madeiras oriundas de florestas naturais por madeiras de reflorestamento. O gênero *Eucalyptus* aparece como uma alternativa promissora devido, principalmente, ao seu rápido crescimento e às tecnologias já desenvolvidas para sua produção, fato incomum para outras espécies florestais (VIEIRA, 2006).

A indústria de base florestal é estratégica para o Brasil, devido ao seu perfil fortemente exportador. Isso contribui para a realização do superávit da balança comercial, propiciando as condições econômicas necessárias à promoção do desenvolvimento social. Em 2012, o Brasil alcançou 7,1 milhões de hectares de florestas plantadas com espécies de eucalipto (71%), pinus (21%) e outras espécies (8%)(ABRAF, 2013).

Devido ao clima tropical ou subtropical na maioria do território brasileiro, tem-se utilizado o gênero *Eucalyptus* em larga escala nas florestas industriais. Devido ao clima, o território brasileiro propicia um crescimento ininterrupto e, conseqüentemente, um rápido acúmulo de biomassa. Para exemplificar o quanto é propício o clima do território brasileiro, a idade de rotação de plantios de eucaliptos no Brasil está entre 5 e 7 anos, enquanto que em países de clima temperado este tempo de rotação salta para aproximadamente 12 anos (SOARES, 2012).

Além disso, o Brasil ocupa uma posição de liderança mundial em silvicultura e melhoramento de *Eucalyptus* devido à atividade agroindustrial e o apoio de instituições governamentais de pesquisa e Universidades. Estima-se que o setor florestal no Brasil seja responsável pela existência de 500 mil empregos diretos e outros 2 milhões indiretos. Desse total, somente o segmento de celulose e papel responde por 150 mil empregos diretos. Em termos tributários, o setor também fornece uma demonstração de força, pois a estimativa é de uma arrecadação anual de R\$ 7,6 bilhões (0,5% da arrecadação nacional) (ABRAF, 2013).

O eucalipto é aplicado em diversas áreas como: óleos essenciais, produtos apícolas, celulose, madeira serrada, postes e moirões, laminados, MDF, HDF, chapa de fibra, compensados, carvão, lenha, além de muitas outras aplicações (SOARES, 2012).

Atualmente, a principal prática silvicultural do eucalipto é do tipo clonal. A silvicultura clonal compreende todo o processo de formação de uma floresta clonal,

incluindo a seleção da árvore superior, a multiplicação vegetativa, a avaliação das árvores selecionadas em teste clonal, a produção de mudas e o estabelecimento da floresta clonal. O clone é definido como uma população de células ou indivíduos originados por divisão assexuada a partir de uma célula ou indivíduo (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2007). A propagação vegetativa, assexuada, não consiste de recombinação genética, o que viabiliza a cópia fiel do genótipo de um indivíduo vegetal. As plantações de espécies originadas de propagação vegetativa não possuem variabilidade genética, constituindo, assim, as populações mais homogêneas do que as formadas por sementes.

2.3 Dendrometria

No setor florestal, o conhecimento sobre os recursos existentes, através da medição ou estimação de atributos da árvore e das florestas, além de muitas características das áreas sobre as quais as árvores estão crescendo, por meio de instrumentos e métodos apropriados é o objeto da Dendrometria (SOARES; NETO; SOUZA, 2011). A dendrometria se encarrega tanto da medição da árvore individualmente, quanto de forma coletiva. E, de forma geral, trata de medidas e/ou estimativas de árvores e florestas. Assim, o objetivo da dendrometria é fornecer informações sobre uma floresta, em parte ou como um todo, por meio de medidas ou métodos estimativos que possibilitem o conhecimento do potencial produtivo e de proteção, com o objetivo de determinar um planejamento para manejo florestal (SILVA; NETO, 1979).

Para a dendrometria, os dados considerados como centrais das árvores, e utilizadas nos levantamentos florestais, são a altura total e os diâmetros medidos no fuste em diversas alturas, em relação ao solo. A medição dos diâmetros pode ser realizada diretamente na árvore, utilizando a suta¹ (Figura 2.1) ou similar.

Devido às dimensões das árvores, as medições da altura total são realizadas indiretamente, com a árvore em pé. As medições indiretas são realizadas utilizando instrumentos para visualizar a base e o topo das árvores e, por princípios geométricos ou trigonométricos, são calculadas essas alturas. Para que o operador possa medir a altura total da árvore, é necessário que o topo e a base estejam visíveis. Porém, a densidade do povoamento, a inclinação do solo ou da árvore e os movimentos dos ventos podem prejudicar essa visualização e aumentar o tempo dos inventários florestais.

Para se obterem os diâmetros nas árvores, podem ser realizadas medições com a árvore em pé, quando essas medidas estão próximas ao diâmetro na altura do peito (DAP). No Brasil é adotada a altura de 1,3m do solo. Medidas acima do DAP poderão exigir o

¹Basicamente é uma régua graduada no sistema métrico decimal, na qual estão inseridos dois braços, um fixo e um móvel, que são paralelos e perpendiculares a esta. (PAULA, 1995)

uso de escadas ou andaimes, quando as alturas ainda forem acessíveis, ou instrumentos tais como Pentaprisma de Wheel e o Relascópio de Bitterlich (PAULA, 1995). Porém, para alturas muito grandes, serão exigidos equipamentos especiais para a escalada, além de muita perícia do operador.



Figura 2.1: *Suta dendrométrica.*

O diâmetro do fuste das árvores é a mais simples, comum e importante na medida das árvores na silvicultura. O diâmetro do caule pode ser usado para correlacionar outras informações mais difíceis de medir, como o volume de madeira do fuste de uma árvore, peso ou biomassa, da árvore. Pode refletir o seu valor comercial, dado que as árvores maiores produzem toras de tamanhos maiores, as quais têm valor comercialmente maior e podem refletir a posição competitiva de uma árvore em relação ao seu crescimento. Uma característica das árvores é que o diâmetro do fuste tende a diminuir progressivamente a partir da base do caule (LAAR; AKCA, 2007).

Para tomar os diâmetros do fuste, serrapilheira (material orgânico que se acumula) na base da árvore devem ser postos de lado antes de fazer a medição. Ao referir-se ao diâmetro, está implícito que os fustes são consideradas circulares em secção transversal. No entanto, o primeiro problema com a medição de diâmetro do caule é que nas árvores, os fustes não são exatamente circulares. Para corrigir isso, são utilizadas aproximações de sua forma, em geral quando utilizada suta são tomadas duas medidas perpendiculares (um ângulo de 90° uma da outra) na mesma altura e é calculada a média geométrica entre os dois valores. Em caso de existir alguma deformidade no fuste na altura a ser medida usualmente, pode-se utilizar algum ponto acima da deformidade da árvore para eliminar a grande variabilidade na forma da árvore (WEST; WEST, 2009).

2.4 Estimativa de Volumes

O volume de uma árvore constitui uma das informações de maior importância para o conhecimento do potencial florestal disponível em uma região. O volume individual fornece um ponto de partida para a avaliação do conteúdo de madeira dos povoamentos florestais (BARBALHO, 2001).

A forma mais precisa de determinar o volume é pelo método do deslocamento de água seguindo o Princípio de Arquimedes, ou seja, as toras são colocadas em tanques cheios de água e, a partir do deslocamento da água, obtém-se o volume delas. Porém, essa forma de obtenção do volume é de difícil aplicação em inventários florestais, devido ao tempo gasto na obtenção, tornando-se uma prática inviável econômica e tecnicamente. Outras metodologias de obtenção de volume de madeira é a prática de cubagem rigorosa e estimativa de volume por meio de equações de regressão (ARAÚJO et al., 2012).

As estimativas de volume podem ser realizadas a partir de várias metodologias, sendo que a mais utilizada são as equações de volume para árvores individuais. Pode-se também obter o volume dos fustes por meio dos fatores de forma, do método dos dois diâmetros, ou de uma relação hipsométrica associada a uma equação de volume, essas metodologias propiciam estimativas precisas e com menores custos, quando comparada com as equações que têm como variáveis independentes o diâmetro e a altura. Para volumes por unidade de área, a equação do povoamento é uma boa opção. Para estimar os múltiplos produtos ou os sortimentos, devem-se utilizar as funções de afilamento, as razões entre os volumes ou as funções *splines* (FRANCO, 1996).

Quando se deseja obter estimativas mais precisas do estoque florestal, pode-se usar modelos matemáticos que estimam o volume para as árvores individuais e gerar tabelas de volume ou modelos que estimam o volume por unidade de área. Scolforo (2005) divide as equações volumétricas em três grupos:

1. Equações de simples entrada: o volume é estimado em função do DAP. Esse diâmetro deve estar fortemente correlacionado com a altura, ou seja, o diâmetro explica bem o desenvolvimento da altura;
2. Equações de dupla entrada: o volume é estimado em função do DAP e da altura total. Neste caso, o DAP não está fortemente correlacionado com a altura, ou seja, o diâmetro não explica bem o desenvolvimento da altura. São recomendáveis quando existe uma maior heterogeneidade na relação altura-diâmetro; e
3. Equações de tripla entrada: o volume é estimado em função do DAP, da altura total e de uma medida que expressa a forma da árvore. Este tipo de modelo não é recomendável, pois a forma da árvore é uma variável difícil de ser quantificada e quando é realizada a cubagem rigorosa, esta já é controlada.

A eficiência de uma equação volumétrica aumenta consideravelmente, se ela possuir poucas variáveis e que estas sejam fáceis de se mensurar com exatidão, que sejam altamente correlacionadas com o volume, que tenham baixa correlação entre si, e o volume estimado por árvore individual aproxime-se do valor calculado pela técnica padrão de cubagem rigorosa da árvore abatida (ROCHA, 1992).

Um modelo bastante utilizado também é o modelo de Schumacher e Hall, frequentemente utilizado em sua forma linearizada, logartítmica, conhecido também como Schumacher e Hall logarítmico ou simplesmente, Schumacher e Hall (log). Esse modelo é ajustado com os parâmetros obtidos de árvores cubadas rigorosamente (CABACINHA, 2003). O modelo de Schumacher e Hall (log) é uma equação volumétrica de dupla entrada que estima o volume das árvores a partir do diâmetro na altura do peito DAP, e da altura total (Ht). Segundo Campos, Júnior e Neto (1985), o modelo de Schumacher e Hall têm apresentado estimativas mais precisas dos volumes, quando comparados com outros modelos volumétricos.

A cubagem rigorosa pode ser descrita como a medição de sucessivos diâmetros ao longo do fuste da árvore. Segundo GOMES (1957), comenta que as medições diamétricas eram realizadas a 0,30; 1,30; 3,30; 5,30 e assim sucessivamente de 2 em 2 metros. Outros autores propõem outras medições considerando a forma e da rigorosidade do processo. Entre eles Scolforo (2005) recomenda as alturas de medições para *Eucalyptus* e *Pinus*: 0,5; 0,7; 1,30; 2,30 com comprimentos das seções entre 1 e 2 metros. Segundo esses autores, esse comprimento deve ser tal, que seja controlado ao máximo o efeito da conicidade e que as seções sejam regulares.

Na cubagem rigorosa, a árvore é dividida em seções, de comprimentos iguais ou não e por meio da utilização de fórmulas geométricas o volume dessas seções é obtido e a soma dos volumes das seções, o volume da árvore é obtido (FAO, 1973).

As principais fórmulas empregadas na cubagem rigorosa são a de Smalian (Equação 4-14), a de Huber (Equação 2-2) e a de Newton (Equação 2-3), considerando que estas são válidas quando as seções assemelham-se a um fuste de parabolóide de revolução (CABACINHA, 2003).

Equação de Smalian:

$$V = L \cdot \frac{(g_1 + g_2)}{2} \quad (2-1)$$

Equação de Huber:

$$V = L \cdot g_m \quad (2-2)$$

Equação de Newton:

$$V = L \cdot \frac{(g_1 + 4 \cdot g_m + g_2)}{6} \quad (2-3)$$

Em que:

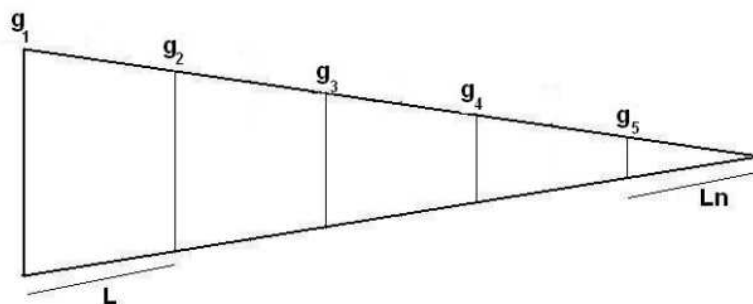
V - Volume da seção;

L - Comprimento do seção (m);

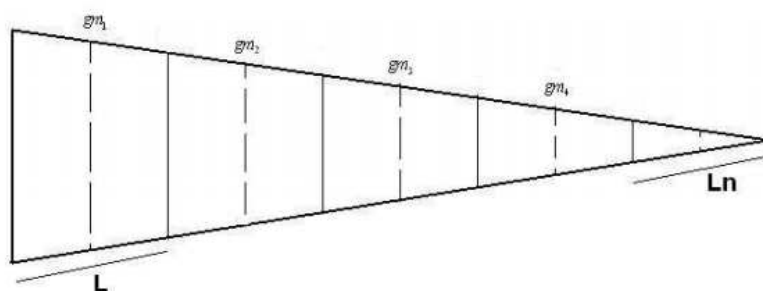
g_1 - área seccional da extremidade inferior da seção (m^2);

g_2 - área seccional da extremidade superior da seção (m^2);

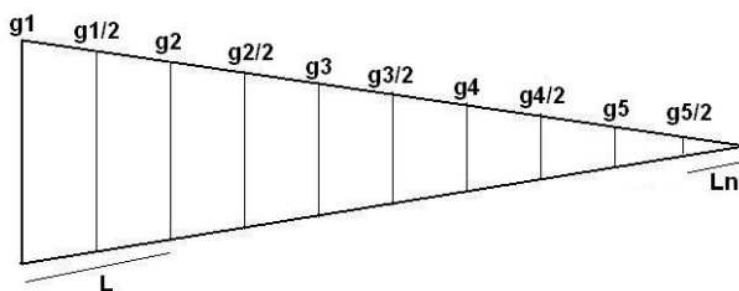
g_m - área seccional no meio da seção (m^2). O modelos de seções podem ser observados na Figura 2.2



(a) Posições de medição, para obtenção da área seccional de acordo com a equação de Smalian



(b) Posições de medição, para obtenção da área seccional de acordo com a equação de Huber



(c) Posições de medição, para obtenção da área seccional de acordo com a equação de Newton

Figura 2.2: Esquema de seções ao longo de um fuste (SILVA; NETO, 1979).

Neste trabalho as estimativas de volume foram realizadas de acordo com o proposto por Soares (2012), que foi sucintamente descrito na seção 2.5. Outros trabalhos

relacionados a estimativa de diâmetros também são descritos nas seções 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9.

2.5 Predição recursiva de diâmetros de clones de eucalipto utilizando rede perceptron de múltiplas camadas para o cálculo De volume

Uma das bases para o desenvolvimento dessa proposta neste foi o trabalho apresentado por Soares (2012). São realizadas análise e predições de diâmetros e cálculo de volumes de árvores do gênero *Eucalyptus*. Neste estudo, o modelo desenvolvido utiliza apenas três medidas de diâmetros da base das árvores, sendo elas nas alturas de 0,3m, 0,7m e 1,3m(DAP) do pé da árvore, e recursivamente, os diâmetros seguintes são preditos utilizando redes neurais. A rede neural utilizada no estudo foi do tipo *perceptron* multicamadas, com utilização do algoritmo *back-propagation* para treinamento desta rede. Foram utilizadas 615 árvores amostradas nas parcelas, cubadas rigorosamente pelo método de Smalian, onde 10% das amostras foram usadas para treinamento da rede neural.

No modelo proposto, foram testadas abordagens com a altura total e com o diâmetro mínimo comercial. Foram gerados dois modelos de redes neurais com dois métodos aplicados em cada um, que apresentaram uma diferença do volume total para 0,66%, 2,35%, 0,58% e 0,18%. Esses valores foram considerados muito satisfatórios e estão bastante abaixo do percentual de erro tolerado, considerado de até 10% nos inventários florestais. O desempenho do modelo nos experimentos foi comparado e os resultados mostraram que o método proposto apresentou desempenho satisfatório em relação aos modelos tradicionais utilizados na Engenharia Florestal.

Na avaliação do método de predição dos diâmetros foram utilizados o *Root Mean Square Error* (RMSE%) e a correlação linear. Com o objetivo de verificar a eficiência do modelo proposto, foram calculados os volumes de todas as árvores usando a equação de Smalian. Para verificar a exatidão dos volumes calculados a partir dos diâmetros estimados, foram calculados os seguintes erros percentuais: Desvio Médio (MAE%), viés (*Bias*%), Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE%) e Correlação Linear.

O modelo proposto por Soares (2012) simplifica grande parte do processo de inventário florestal, quando comparado à cubagem rigorosa, principalmente pela redução no número de amostras a serem cubadas, sendo somente necessária uma quantidade reduzida para o treinamento da rede neural. Apesar da redução do esforço no processo de inventário, a proposta não se isenta de erros na medição dos diâmetros da base das

árvores, que podem ocorrer por negligência do operador e/ou defeitos dos instrumentos, impactando negativamente as estimativas realizadas pela rede neural.

2.6 Accuracy and efficiency of the Laser-camera

Melkas et al. (2008) apresentaram um novo dispositivo de medição de diâmetro chamado de Laser-câmera que foi testado sob condições típicas de florestas. O dispositivo foi construído com uma câmera digital Canon EOS 400D e um Mitsubishi ML101J27 gerador de laser de linha integrado. O princípio da Laser-câmera é baseada na reflexão de uma linha de laser e um ponto da árvore e o processamento de imagens digitais (Figura 2.3 (a)).



(a) Laser-câmera



(b) Princípio de medição de diâmetro

Figura 2.3: Laser-câmera e seu princípio de medição de diâmetro (MELKAS et al., 2008).

O princípio da medição de diâmetros de árvores com o novo protótipo Laser-câmera é baseada na reflexão de um laser de linha em ponto do fuste da árvore (Figura 2.3 (b)). A projeção do laser de linha rompe as linhas de fronteira do fuste de árvore, de modo que o diâmetro do fuste pode ser medido, com base no comprimento do laser de linha projetado. O comprimento da linha de laser pode ser obtido a partir da fotografia, como o número de pixels e escala da imagem. A escala da fotografia pode ser derivada a partir da distância entre o laser de linha e o ponto. O algoritmo de interpretação das imagens desenvolvido centra-se no fuste e, automaticamente, reconhece os pontos de feixe de laser e o laser projetado no fuste da árvore e calcula o diâmetro. A medição é obtida a partir do centro da fotografia.

O gerador de laser de linha é ligado automaticamente quando a câmera foca. Um sensor eletrônico (Masser Ltd.) pode ser adicionado ao dispositivo, para obter a altura, permitindo que sejam observados vários diâmetros a partir de diferentes alturas do fuste.

O peso da Laser-câmera é de aproximadamente 1,5 kilo. O preço do protótipo Laser-câmera é de 2600 a 3000 euros, enquanto que os custos de computador de campo em torno de 1000 euros.

Para os testes do dispositivo, as árvores foram marcadas com etiqueta contendo um número. A medida do diâmetro foi tomada abaixo do rótulo com número. Os diâmetros das árvores foram determinados com uma suta metálica na altura do DAP. O material de estudo incluiu um total de 728 medições de diâmetro, a partir de 265 árvores de três espécies diferentes: *Picea*, *Bétula* e *Pinus*.

As árvores foram fotografadas com um Laser-câmera no campo, em seguida, as medições do diâmetro da árvore foram interpretados a partir das fotografias. Se a árvore não era visível a partir do ponto escolhido, o observador mudava a posição a fim de aumentar a visibilidade. A maioria das fotos tiradas com o Laser-câmera foram interpretadas em seguida, com a ajuda de um programa de interpretação desenvolvido para este fim específico. Durante a coleta de dados, duas fotografias foram tiradas de cada árvore.

Os erros mais comuns eram causadas pelo laser, que não era projetada corretamente no fuste da árvore, por obstáculos que dificultaram a visibilidade da árvore ou direção e altura erradas para a medição. As medições de diâmetro da árvore pode ser obtido com um Laser-câmera com tempo que varia em torno de 10 segundos por medição. O método utilizado foi comparado estaticamente com modelos tradicionais. Usaram o *Bias*, desvio padrão e erro padrão. O erro padrão das observações de diâmetro, usando interpretação semiautomática, foi de 6 mm (5,3%). A precisão das observações de erro padrão máximo para a espécie *Picea* foi de 5,0 mm (4,4%), seguido de *Bétula* 6,4 mm (3,3%) e *Pinus* 7,6 mm (7,6%).

A proposta de Melkas et al. (2008) teve resultados satisfatórios, mostram algumas desvantagens quanto ao método proposto, sendo que para cada medida de interesse devem ser tiradas novas fotografias ajustando o laser de linha à altura desejada.

2.7 Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique - A proof of concept

Morgenroth e Gomez (2014) propõem testar o potencial para um junção SfM-MVS (*Structure from Motion* juntamente com *Multiple-View Stereophotogrammetry*), na determinação de volume de árvores, obtendo com precisão a altura da árvore e o diâmetro do caule. SfM é uma técnica em visão por computador, que calcula a posição de objetos 3D em uma cena de uma série de fotografias. Ele usa uma técnica assumindo que um objeto numa cena 3D está localizado num vetor entre a imagem do objeto obtido com

câmara e o objeto em si. A técnica permite a construção de um nuvem de pontos em 3 dimensões. SfM não necessita de calibração ou de controle da posição da câmera. Além disso, foi uma alternativa considerada pelos autores de baixo custo em relação a tecnologias laser. A segunda parte do método, o MVS, é uma técnica de visualização que reconstrói uma nuvem de pontos 3D texturizados do SfM usando fotografias (Figura 2.4).



(a) Exemplo de foto tirada para reconstruir o modelo.



(b) Imagem total da cena.



(c) Diferentes posições de onde foram tiradas fotografias para SfM.



(d) Modelo 3D texturizada produzido por SfM-MVS

Figura 2.4: Conceito do SfM-MVS (MORGENROTH; GOMEZ, 2014).

Para experimentar o método, os testes foram limitados a duas situações, sendo uma única árvore em vaso, em um ambiente de laboratório e duas árvores de diferentes espécies e tamanhos em ambientes naturais para testar a viabilidade fora do laboratório. A precisão das medições da altura das árvores e diâmetro do caule foram comparados com estimativas obtidas a partir do modelo 3D criado, usando SfM-MVS. Os resultados indicam que o método SfM é promissor e considerado barato frente a outros métodos. As estimativas de altura das árvores tiveram margem de erro de 2,59%, enquanto as estimativas do diâmetro do fuste tiveram 3,7%.

O estudo realizado por Morgenroth e Gomez (2014) se mostra promissor quanto a eficiência em determinar as informações de uma árvore; entretanto, o fato de serem

necessárias várias fotografias em diferentes posições, gera um custo elevado considerando o tempo gasto. Em ambiente de florestas plantadas, devido ao espaçamento reduzido a proposta pode não ser viável por uma árvore obstruir outra nas imagens.

2.8 Diameter Measurements of the Upper Parts of Trees Using an Ultra-Telephoto Digital Photography System

Shimizu et al. (2014) desenvolveram um novo método para medir os diâmetros de árvores a grandes alturas do solo, considerada pelos autores simples e barata. O sistema utiliza uma câmera digital com uma lente de teleobjetiva, para obter uma imagem que pode ser usada para medir o diâmetro da parte superior do fuste de uma árvore. Uma vez que este método requer a distância de medição e a altura do ponto alvo na imagem, um sensor que usa laser para medir a distância e o ângulo foi adicionado ao sistema (Figura 2.5).



Figura 2.5: Sistema desenvolvido usando a câmera digital e lente teleobjetiva (SHIMIZU et al., 2014).

O diâmetro de uma posição da árvore pode ser obtido através da medição da imagem digital, usando software de edição de imagem e cálculos. Foi realizada a calibração para compensação de escala das características da combinação de uma lente telescópica, uma câmera digital, e adaptadores. A regressão linear entre a conversão de comprimento por pixel na imagem e distância do objeto foi criada. Usando a equação de regressão obtida, foi possível de converter os pixels para um comprimento real.

Para que o diâmetro alvo fosse calculado a partir da fotografia da parte mais alta do fuste usando análise de regressão, o procedimento detalhado foi descrito:

1. Um programa de edição de imagem foi utilizado para medir o diâmetro (comprimento horizontal) em unidades de pixel.
2. O diâmetro real foi determinado por meio do cálculo em unidades de milímetros a partir do valor de pixel adquirido usando a equação de regressão criada. Em primeiro lugar, o comprimento (mm) por pixel em uma fotografia é determinado a partir da distância da árvore. Em seguida, um valor de diâmetro real (mm) é obtido por multiplicação do diâmetro em unidades de pixel por este valor do comprimento.

No que diz respeito à precisão estimada de todas as árvores medidas, a taxa de erro máximo foi de 7,0% (1,45 cm), com 2% a 4% de erro para a maioria dos resultados estimados. Foi observada a precisão da estimativa menor que 1 cm, reproduzida em quase todas as medições.

A proposta apresentada Shimizu et al. (2014) tem por objetivo estimar os diâmetros de árvores a grandes alturas e foi testado com seis árvores da espécie Cedro japonês. A estimativa dos diâmetros, basicamente, é realizada pela perícia humana, os autores não automatizaram o reconhecimento do fuste. O sistema depende da visualização do fuste das árvores a grandes alturas, o que pode ser difícil no interior de florestas densas.

2.9 Comparison of different Laser-based methods to measure stem diameter

O trabalho de Vastaranta et al. (2008) comparou o *Terrestrial Laser Scan* (TLS), o Laser-câmera e o Laser-relascópio usados para medir o diâmetro da árvore no DAP em condições de floresta boreal. Diâmetros de referência foram medidos com suta metálica.

Para obtenção dos dados com TLS foi utilizado o dispositivo Faro 880HE80 TLS. O programa Faro Scene foi usado para todas as medições. Primeiro, para determinar o nível do solo no fuste da árvore, utilizando os dados digitalizados, usando uma visão 3D. A partir do nível do solo a altura de 1,3 metros (DAP) foi medida e marcada na imagem de intensidade (Figura 2.6). Na altura marcada, a imagem intensidade foi utilizado para medir os ângulos horizontais para o lado esquerdo e direito da fuste e a distância até ao meio do fuste. Estes valores foram utilizados para calcular o raio da árvore, obtendo-se assim o seu diâmetro.

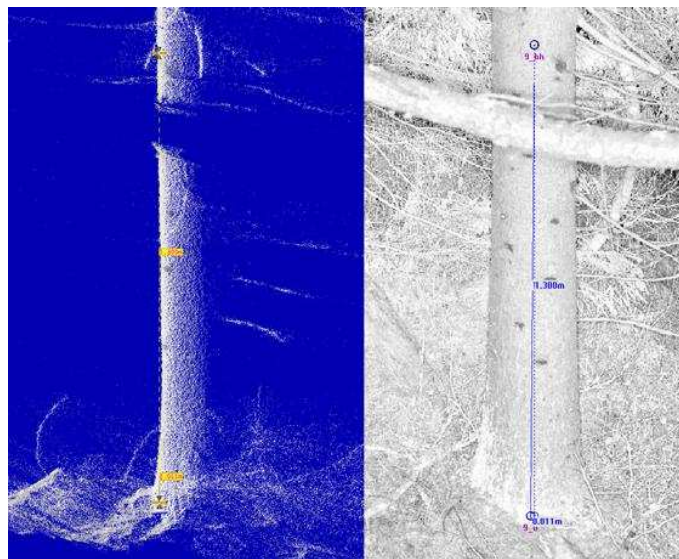


Figura 2.6: Esquema para medir o diâmetro com TLS (VASTARANTA et al., 2008).

Na Figura 2.6, à esquerda os pontos de laser digitalizados de um fuste da árvore, imagem de intensidade à direita. Nível do solo e 1,3 metros de altura são mostradas em ambas as imagens.

A Laser-câmara consiste de uma câmera digital Canon EOS 400D com uma Mitsubishi ML101J27 e gerador de laser de linha integrado. O Laser-relascópio é funcionalmente uma combinação de um relascópio e um dendrometer.

Os dados para este estudo foram coletados em áreas de Nuuksio e Saunalahti em Espoo no sul da Finlândia. Seis parcelas circulares foram medidas para o estudo por meios diferentes. As parcelas incluíram um total de 122 pinheiros escoceses (*P. sylvestris*), Picea vermelhos de Noruega (*P. abies*), Bétula (*B. pendula* e *B. pubescens*) e outras árvores.

As medições tomadas por meios tradicionais foram usadas como referência. As diferenças entre os valores de referência e os valores medidos foram calculadas. No entanto, todas as medições de referência com suta também incluem erros de medição. Para efeitos de comparação, os erros foram obtidos em revisão da literatura realizada pelos autores. Os erros padrão foram usados como compensação, ao estimar a precisão dos diferentes métodos.

Os resultados mostraram que o TLS e o Laser-câmara foram considerados tão precisos como os meios tradicionais em medições de diâmetro, e a utilização de Laser-relascópio não teve a mesma exatidão. Os erros padrão para o TLS, Laser-câmara e Laser-relascópio foram de 8,3 mm (4,5%), 8,5 mm (4,9%) e 17,5 mm (10,1%), respectivamente. O *Bias* nas medições TLS foi de apenas 0,5 mm (0,3%) e as medições do Laser-câmara de 0,6 mm (0,3%). O viés geral do Laser-relascópio foi de 9,1 milímetros (5,2%).

O TLS e Laser-câmera foram considerados métodos precisos de medição de DAP. Estes métodos também permitem a medição de outras características, tais como vários diâmetros em diferentes alturas, o que pode melhorar a precisão do volume das árvores. Estas possibilidades foram colocadas como possíveis em trabalhos futuros.

A proposta dos autores compara métodos diferentes e utiliza o erro padrão da suta para compensar o possível erro na medida de referência. O método TLS permite que em uma mesma imagem, possam ser obtidos diâmetros em varias alturas, mas dependem da perícia humana na marcação do nível do solo.

2.10 Considerações Finais Deste Capítulo

Este capítulo apresentou uma visão geral sobre a atividade do inventário florestal, dendrometria, além de mostrar algumas das abordagens tradicionais e novas abordagens de medição de diâmetros e estimação de volume.

O próximo capítulo apresenta uma breve abordagem de técnicas geometria tridimensional na área de visão computacional. É apresentado os principais modelos de tecnologias e dispositivos usadas para obter dados de profundidade de cenas e técnicas que fazem uso desses dispositivos.

Técnicas de Geometria tridimensional em Visão Computacional

3.1 Introdução

Visão computacional pode ser definida como a ciência que caracteriza informações de interesse numa imagem, a qual é estruturada na definição do problema visual a ser analisado e solucionado, organizado nas etapas sequenciais de aplicação: aquisição, pré-processamento, segmentação, extração de características e reconhecimento. Trata-se da integração de processos e representações gráficas usadas para a percepção visual (LULIO, 2011).

A estrutura de um sistema de visão computacional contém as etapas sequenciais, mediante a descrição de um problema visual: aquisição, pré-processamento, segmentação, normalização das características de interesse, classificação e reconhecimento de padrões, à resolução do problema (Figura 3.1). Todas são interligadas a uma base de conhecimento dos resultados obtidos.

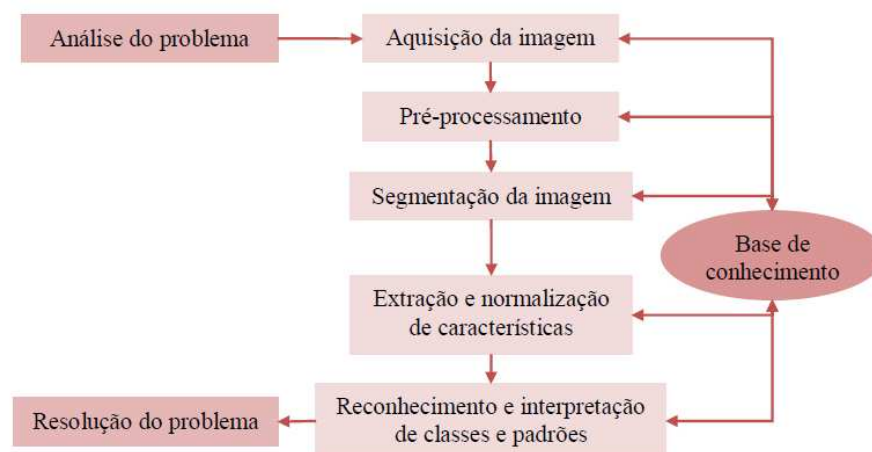


Figura 3.1: Estrutura sequencial de um sistema de visão computacional (LULIO, 2011).

A estrutura sequencial das etapas presentes no sistema de visão computaci-

onal se divide ainda em três estágios, sendo visão em baixo nível (aquisição e pré-processamento), visão em nível intermediário (segmentação, extração e normalização de características), visão em alto nível (classificação, reconhecimento e correspondência) (FORSYTH; PONCE, 2002). Para todos esses estágios, a tarefa final de um sistema de visão computacional é modelar ou representar a imagem de entrada com o correspondente na base de conhecimento, através de interpretação, decisão ou descrição dos classificados. A representação das imagens, então, pode ser definida pela área de aplicação:

1. Imagens generalizadas que são icônicas e atendem pelas propriedades físicas da cena;
2. Imagens segmentadas sendo classificadas pelos segmentos ou regiões de interesse na imagem;
3. Imagens geométricas que atendem pela disposição geométrica da cena, para simulação de efeitos entre as componentes envolvidas no formato bidimensional ou tridimensional;
4. Imagens relacionais que são estruturadas em interpolação de componentes dentro da cena, cujo interesse do problema a ser solucionado baseia-se na sua inter-relação.

Na aquisição de dados em visão computacional, há considerável quantidade de informações na imagem adquirida, as quais dependem da forma e equipamentos de captura, que podem ser, dimensão e representação espacial/geométrica, cor, textura e informação temporal para a aquisição dinâmica de imagens. As técnicas e operações aritméticas dedicadas ao estudo e análise das informações de tais imagens contemplam a área de Processamento Digital de Imagens, cuja aplicação busca a melhoria e realce de determinados aspectos da imagem tratada (LULIO, 2011).

O processamento de imagens digitais é direcionado para funções e finalidades específicas, uma vez que o tempo de processamento, características e informações de entrada, e base de armazenamento devem ser considerados, para que possam ser aplicados em tempo real ou manipulados de acordo com a necessidade temporal.

Na perspectiva deste trabalho, para aquisição dos dados para o sistema de visão computacional, foi utilizado como equipamento de captura, um sensor de profundidade, pois um dado de interesse é a profundidade de uma cena.

3.2 Sensores de Profundidade

Os sensores de profundidade possuem características similares aos das câmeras digitais comuns: eles têm um campo de visão limitado e só podem coletar informações sobre as superfícies que não estejam oclusas a partir de sua perspectiva. A diferença básica entre os sensores de profundidade e as câmeras digitais é que, enquanto as câmeras

digitais capturam informações de cor sobre superfícies que estejam dentro de seu campo de visão, o sensor de profundidade obtém um conjunto de distâncias até as superfícies que estejam sob sua perspectiva. A imagem produzida por um sensor de profundidade descreve através de seus pixels um conjunto de distâncias (NETO, 2014). A figura 3.2 exibe a projeção no espaço tridimensional dos pixels de uma imagem de profundidade.



Figura 3.2: *Exemplo de imagem de profundidade (NETO, 2014).*

É bastante comum a utilização de sensores de profundidade na digitalização de objetos tridimensionais, onde, através das imagens de profundidade capturadas por esse dispositivo, cria-se uma nuvem de pontos representando a superfície de um objeto, que pode então ser utilizada para processar a sua forma através de métodos de reconstrução tridimensional (BLAIS, 2004; MOLYNEAUX, 2012).

Os primeiros sensores de profundidade eram, em sua maioria, analógicos, esses dispositivos utilizavam fotodiodos de efeito lateral e câmeras vidicon para converter informações ópticas em sinais elétricos, que eram então processados para extrair informações de profundidade. Essas tecnologias eram difíceis de calibrar, por consequência de imprecisões e desvios eletrônicos. Durante a década de 1970 e início da década de 1980, o aumento da disponibilidade de dispositivos eletro-ópticos e a popularização dos computadores pessoais, tornou viável o desenvolvimento de sistemas de sensores de profundidade automatizados para aplicações industriais (NETO, 2014).

Atualmente, os tipos de sensores de profundidade mais comuns são as câmeras estereoscópicas, escâneres por triangulação laser, câmeras de tempo de voo e câmeras baseadas em luz estruturada (NETO, 2014). Os sensores de profundidade já são largamente utilizados para diversas aplicações industriais como análise eletrônica, inspeção de alimentos e criação de modelos tridimensionais para museus, através do escaneamento de objetos e de patrimônios arquiteturais (BLAIS, 2004). A seguir uma breve descrição de cada um dos tipos de sensores citados.

3.2.1 Câmeras Estereoscópicas

Câmeras estereoscópicas podem ser consideradas como sistemas de visão computacionais que se baseiam na aquisição de pares de imagens, para posterior decodificação da informação tridimensional implicitamente capturada nelas (CYGANER; SIEBERT, 2011). Este tipo de sensor é muito utilizado para capturar vídeos ou imagens estereoscópicas, que são atualmente populares em cinemas e monitores 3D.

Suas imagens formadas em cada uma de suas câmeras, apresentam diferenças entre as posições dos objetos, que variam de acordo com sua distância. É possível, então, estimar a sua posição tridimensional com base nessa informação e na disposição entre as câmeras. Esse processo é chamado de estereofotogrametria, ou seja, a medição de distâncias dos componentes de uma cena a partir de imagens estéreo (NETO, 2014).

3.2.2 Escâneres de triangulação a laser

Escâneres de triangulação a laser foram baseados na triangulação a laser criada pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá, em 1978, que criou os fundamentos do laser sincronizado, que utilizam espelhos de varrimento para o seu direcionamento. A introdução de novas tecnologias em sensores de captura gerou um importante avanço para este tipo de sensor, onde a detecção da posição do laser emitido passou a ser limitado somente por seus limites físicos (MAYER, 1999).

O escâner de triangulação a laser tem desempenho limitado pelas leis da Física Óptica, e tem seu funcionamento ótimo em um sistema óptico ideal, sujeito a uma taxa de ruídos desprezível. Devem ser levados em conta apenas os limites de distorção e difração.

3.2.3 Câmeras de tempo de voo

Foram desenvolvidas com base no princípio do tempo de voo. Esse tipo de sensor já é bastante utilizado em reconstrução geométrica de objetos e reconhecimento de gestos. As câmeras de tempo de voo (TOF) são uma ótima opção para registro de grandes estruturas, já que permitem medições de intervalos mais longos com precisão relativamente constante, durante todo o volume; no entanto, como esses sistemas se baseiam na detecção do tempo de voo da luz através do ar, as medições realizadas podem ser afetadas por jatos de ar e variações de corrente nos dispositivos eletrônicos. Diferentes métodos são utilizados para este tipo de sensor como emissão de pulsos, modulação de amplitude, modulação de frequência, detecção híbrida, e automistura de diodos (DROESCHEL; STÜCKLER; BEHNKE, 2011; WANG, 1987; KOLB et al., 2009).

3.2.4 Escâneres holográficos

Esses escâneres são baseados em interferometria, também denominados como escâneres holográficos, são essencialmente imagens holográficas de polígonos em rotação. Geralmente os escâneres holográficos têm a forma de um disco, que é rotacionado em torno do seu eixo, onde as grades holográficas codificados nos vários setores desse disco representam visões em múltiplos ângulos do holograma registrado (NETO, 2014).

3.2.5 Câmeras de luz estruturada

As câmeras de luz estruturada, têm seu funcionamento baseado na projeção de padrões luminosos sobre a cena. Os padrões projetados variam de acordo com a abordagem utilizada, assim como as características dos dispositivos utilizados. Podem ser utilizadas abordagens que fazem uso de múltiplas câmeras para detectar a correlação entre os padrões gerados, projeções sequenciais de padrões codificados, interferências de fases de padrões marginais e sistemas ópticos capazes de criar distorções nos padrões de acordo com a distância do dispositivo (CYGANNEK; SIEBERT, 2011; ZALEVSKY et al., 2013).

As câmeras de luz estruturada são populares por causa da disponibilidade de projetores de baixo custo, além da possibilidade de digitalização de volumes tridimensionais completos em um única imagem. Diferentes modelos de câmeras de luz estruturada, desenvolvidas especialmente para a detecção de gestos em tempo real, foram recentemente difundidas para utilização em jogos e sistemas computacionais (LITOMISKY, 2012).

A precisão de profundidade deste tipo de dispositivo é comparativamente menor do que a de escâneres de laser pontuais ou outros sensores, o uso de luz incoerente remove o ruído associado, resultando em dados mais suaves. Esse tipo de sensor é bastante utilizado para registrar corpos humanos em movimento, já que, para este fim, a precisão das imagens de profundidade não é tão importante quanto o registro em tempo real de superfícies suaves. As principais desvantagens desses sensores em comparação com outras câmeras de profundidade consistem em: não funcionar sob forte iluminação natural, e terem um alcance funcional limitado a poucos metros. Entretanto esse tipo de câmera foi eleito para este trabalho, por conta de sua popularização no cenário mundial, e da vasta gama de informações para a manipulação de interfaces fornecidas por algumas de suas bibliotecas de funções; além da possibilidade de utilização de diversos dispositivos, como os sensores desenvolvidos pela Microsoft (Figura 3.3) (ZHANG, 2012; LITOMISKY, 2012).



Figura 3.3: *Câmera de luz estruturada Microsoft Kinect (ZHANG, 2012).*

Este tipo de sensor tem as vantagens de ter baixa invasibilidade e alta praticidade e controle de iluminação próprio, e a sua capacidade intrínseca para o registro de informações tridimensionais. Em geral apresentam precisão e velocidade de captura inferiores, em comparação a outros sensores. Mesmo assim, são dispositivos de alta disponibilidade por terem baixo custo comparado a outros tipos de sensores, o que motivou sua escolha para o desenvolvimento deste trabalho.

Microsoft Kinect

Teve seu lançamento em novembro de 2010, a câmera de profundidade Kinect para XBOX foi criada pela companhia israelense PrimeSenses, sendo a principal contribuição da Rare, empresa subsidiária da Microsoft Game Studios, o desenvolvimento de softwares para a interpretação de gestos a partir deste dispositivo (GILES, 2010). Este foi então o primeiro modelo de câmera de luz estruturada vendido diretamente ao público em geral. Sendo originalmente desenvolvido para funcionar no console XBOX 360, ela teve sua primeira biblioteca de funções para computador, a libfreenect produzida por Hector Martin, poucos dias depois do seu lançamento (ROGERS, 2011). Foram lançados outros *softwares* para a utilização do Kinect para XBOX 360 em computadores, primeiramente pela empresa contratada para desenvolver este produto, a PrimeSenses, e posteriormente pela própria Microsoft, que, atualmente, já mantém uma segunda versão deste dispositivo especialmente melhorado para funcionar em computadores, denominado então como Kinect para Windows (NETO, 2014).

O Microsoft Kinect é atualmente a câmera de profundidade com maior compatibilidade, e conta com diversas bibliotecas de função criadas para manipulação desse tipo de *hardware*, onde algumas dessas bibliotecas apresentam compatibilidade com outros tipos de sensores de funcionamento similar, o que o torna o modelo ideal para estudos, bem como para a popularização de interfaces gestuais baseadas nesse tipo de tecnologia (NETO, 2014).

O Kinect é descrito, muitas vezes, como um sensor para captura de movimentos de usuários. Ele, na verdade, é uma câmera de profundidade baseada em luz estruturada.

Esse tipo de dispositivo é capaz de obter matrizes de profundidade relativas ao ambiente, o que permite a sua utilização para diversos outros tipos de aplicações, sendo a interpretação de gestos realizada por outros aparelhos, como computadores pessoais e o console XBOX 360, por meio das informações que ele fornece. Os principais componentes desse sensor consistem em: uma câmera colorida, um emissor laser infravermelho, uma câmera monocromática com filtro para luz infravermelha e um sistema computacional interno (ZHANG, 2012). Além disso, também são utilizados um acelerômetro, um conjunto de microfones embutidos e um pequeno motor elétrico (ZHANG, 2012). A Figura 3.4 exibe a distribuição de alguns desses dispositivos, onde o sistema computacional pode ser parcialmente visto.

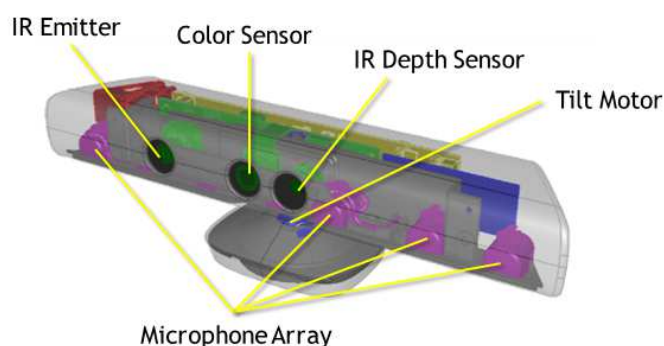


Figura 3.4: Distribuição dos sensores e atuadores do Microsoft Kinect (LABELLE, 2011).

A câmera infravermelha deste aparelho utiliza o sensor CMOS MT9M001, também da Aptina Imaging, com 1,3 megapixels de resolução e 5,2 microns pixels de abertura (EL-LAITHY; HUANG; YEH, 2012). O Kinect para XBOX pode transmitir a saída dessa câmera diretamente, funcionando como uma câmera infravermelha comum, onde ele exibe a luz estruturada projetada sobre o ambiente em uma resolução de 640x480 pixels a 30 Hz, ou 1280x1024 pixels a uma taxa de atualização de 15 Hz. O registro da luz estruturada projetada é utilizado para criar imagens de profundidade, onde o intervalo de percepção deste dispositivo é de 0,6 a 3,5 metros. Fora destes limites, as imagens começam a degradar e perder precisão. A saída do vídeo de profundidade também é disponibilizada em resolução VGA (640x480 pixels) a 30 Hz com 11 bits de precisão, o que possibilita até 2.048 níveis de sensibilidade (FRATI; PRATTICIZZO, 2011).

O chip da PrimeSense PS1080, Figura 3.5, é responsável por controlar o projetor infravermelho, interpretar os dados das câmeras, calcular as matrizes de profundidade e coletar os dados de áudio dos microfones.

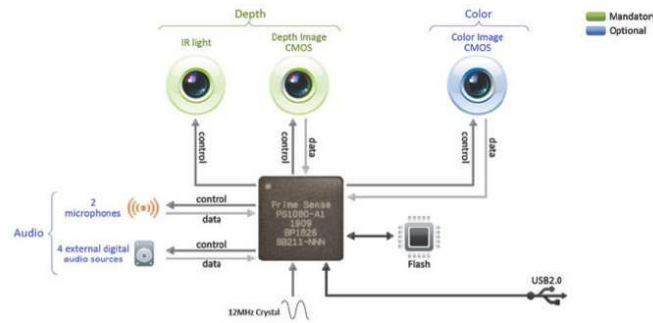


Figura 3.5: Esquema da Placa Prime Sense PS1080 (EL-LAITHY; HUANG; YEH, 2012).

A comunicação USB 2.0 utilizada costuma ser o maior empecilho de velocidade e qualidade para a captura de imagens utilizando o Kinect, além de limitar a quantidade de dados transmitidos internamente, restringindo o tamanho padrão das imagens fornecidas (EL-LAITHY; HUANG; YEH, 2012).

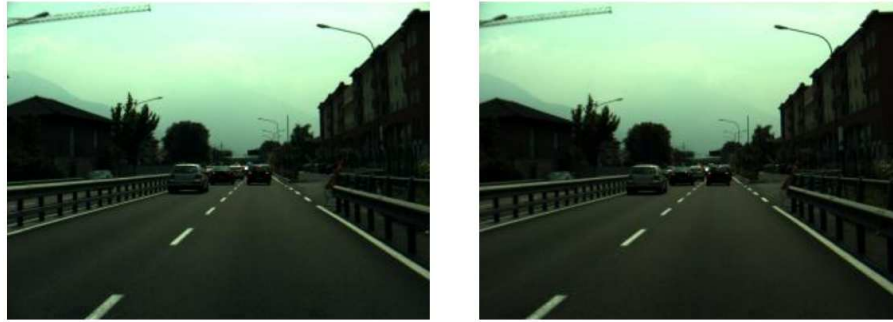
3.3 V-Disparity

Entre as técnicas para extração de informações das imagens de profundidade, está o método proposto por Labayrade, Aubert e Tarel (2002), chamada *v-disparity* (Figura 3.6), que permite detectar o plano do solo utilizando câmeras estéreo (Figura 3.6(a)). Utilizando o mesmo conceito de histograma de gradientes, os autores criaram um histograma de disparidade de valores para cada linha de uma imagem de disparidades (Figura 3.6(b)), o que conceituaram como imagem *v-disparity*. Um exemplo de um V-disparidade imagem é mostrado na Figura 3.6(c).

Apesar de a técnica *v-disparity* ser originalmente desenvolvida para câmeras estéreo, o método foi aplicado ao trabalho de Rougier et al. (2011) que utiliza o Microsoft Kinect. O estudo apresentado por esses autores cita que deve ser realizado calculo da disparidade a partir dos dados de profundidade fornecidos pelo dispositivo.

A imagem *v-disparity* é gerada a partir da contagem da ocorrência das disparidades por linha, ou seja o valor de cada pixel é definido pelo número de repetições de uma disparidade em uma linha, gerando assim um diagrama de disparidade por linha. A linha reta correspondente ao plano do solo, então, pode ser extraída usando a transformada de Hough, assumindo que o chão representa uma parte suficientemente grande da cena (ZHAO; KATUPITIYA; WARD, 2007; MURARKA; SRIDHARAN; KUIPERS, 2008; ROUGIER et al., 2011).

A Transformada de Hough em imagens digitais consiste em mapear os pontos de uma imagem digital para um espaço de parâmetros, de forma que padrões contidos na imagem possam vir a ser evidenciados. A transformada de Hough se baseia na equação



(a) Par de imagens de uma câmara estéreo.



(b) Imagem de disparidade resultante.



(c) Imagem
v-
disparity.

Figura 3.6: *Princípio do v-disparity (ZHAO; KATUPITIYA; WARD, 2007).*

da reta no plano cartesiano. A partir de acumuladores de características obtidos com a transformada, podem ser evidenciadas linhas que estão na imagem (ATIQUZZAMAN; AKHTAR, 1995). O mesmo pode ser realizado na imagem *v-disparity* como observada na Figura 3.7.



Figura 3.7: Exemplo de linha obtida com a transformada de Hough (ZHAO; KATUPITIYA; WARD, 2007).

As linhas obtidas aplicando a transformada de Hough em imagens podem não ser as equivalentes ao plano no solo. Diversos autores Zhao, Katupitiya e Ward (2007), Murarka, Sridharan e Kuipers (2008), Rougier et al. (2011) utilizaram a inclinação das câmeras em relação ao solo para selecionar a linha de interesse. Yang et al. (2010) propuseram uma outra abordagem para ambientes ao ar livre. Nela, é realizado um sistema de votação em que cada ponta a imagem *v-disparity* é um voto para a linha mais próxima obtida pela transformada de Hough, e a linha que obtiver maior numero de votos é considerada equivalente ao plano do solo.

Com a imagem *v-disparity* e a linha correspondente ao plano de solo, são conhecidos os pixels pertencentes ao chão e, a partir deles, pode ser gerada a Equação do Plano 3-1:

$$x_n \cdot (x_0 - x) + y_n \cdot (y_0 - y) + z_n \cdot (z_0 - z) = 0 \quad (3-1)$$

Onde:

- x_n, y_n, z_n são as coordenadas normais do plano e podem ser obtidos com as coordenadas da linha utilizando o cálculo dos mínimos quadrados;
- x_0, y_0, z_0 são as coordenadas de um dado ponto, pertencente ao plano;
- d é o deslocamento do plano a origem das coordenadas.

Na equação do plano, podem ser utilizados os valores das coordenadas dos pontos da imagem de profundidade com a finalidade de determinar se este pertence ou não ao chão.

3.4 Considerações Finais Deste Capítulo

Este capítulo apresentou uma revisão de aplicações de sobre visão computacional aplicada a imagens tridimensionais. Foram mostradas diversas tecnologias de obter imagens de profundidade e técnicas aplicadas a essas imagens para extrair características importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

O próximo capítulo apresenta o modelo proposto neste trabalho. São apresentados alguns detalhes de todos os passos realizados no método, bem como os métodos estatísticos utilizados para validar o modelo proposto.

Modelo de Medição Automatizado de Diâmetros de Árvores

4.1 Introdução

Ao realizar o estudo sobre as técnicas, procedimentos e características envolvidas no processo de inventário florestal em plantio de florestas de eucaliptos e uma revisão bibliográfica, observa-se que técnicas de visão computacional podem complementar esse processo. Ao fazer uma análise do trabalho proposto por Soares (2012), pode-se perceber a possibilidade de obter as medidas do diâmetro exigidas na proposta por técnicas de visão computacional. Este trabalho, então, foca na descrição de um processo que permita obter esses dados necessários para estimar o volume das árvores de eucalipto utilizando a técnica de Soares (2012). O método proposto aqui, tem como base as características do trabalho de Soares (2012), e possui como esquema base a Figura 4.1.

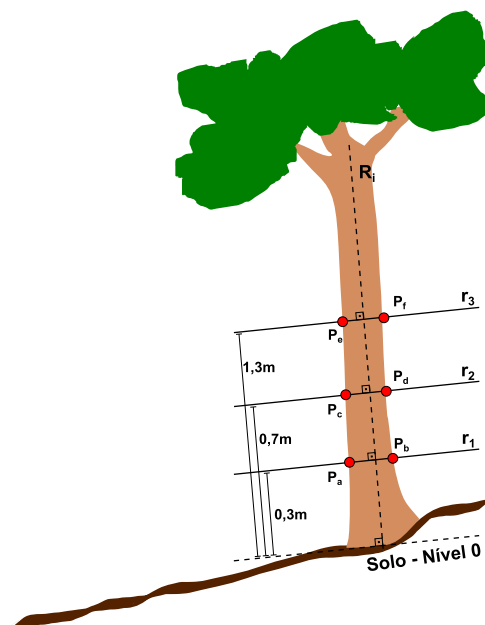


Figura 4.1: Esquema de obtenção dos diâmetros da árvore.

No esquema da Figura 4.1 podem ser observadas as características do ambiente como a inclinação do solo, que é considerado como nível 0, a inclinação da árvore, descrita pelo segmento de reta R_i , pelas alturas de interesse marcadas pelos segmentos r_1 , r_2 e r_3 , sendo equivalentes, respectivamente, as alturas de 0,3; 0,7 e 1,3 metros da base da árvore e aqui denominadas $H_{0,3}$, $H_{0,7}$ e $H_{1,3}$. Os diâmetros a serem encontrados são a distância entre os pontos que estão sobre os segmentos de reta marcados pelos pontos vermelhos, P_a a P_b , P_c a P_d e P_e a P_f , nomeados $D_{0,3}$, $D_{0,7}$ e $D_{1,3}$. O modelo representado na Figura 4.1 leva em consideração as valores e coordenadas reais.

Tendo em vista o esquema elaborado, foram definidos os passos para se chegar aos diâmetros de interesse. São eles:

1. Captura das imagens de profundidade.
2. Pré-Processamento das imagens de profundidade.
3. Extração dos pontos na imagem de profundidade relativos ao solo.
4. Exclusão dos pontos do fundo na, imagem de profundidade, que não sejam de interesse.
5. Segmentação do fuste da árvore.
6. Encontrar a inclinação do fuste da árvore R_i .
7. Localizar as alturas $H_{0,3}$, $H_{0,7}$ e $H_{1,3}$ na imagem de profundidade.
8. Encontrar as equações das retas que representem r_1 , r_2 e r_3 .
9. Localizar os pontos extremos dos diâmetros P_a , P_b , P_c , P_d , P_e e P_f .
10. Calcular os diâmetros $D_{0,3}$, $D_{0,7}$ e $D_{1,3}$ da árvore.

Os passos podem ser descritos nas seções Captura da imagem de profundidade (4.2), que descreve a composição e configuração do sistema desenvolvido e o passo 1, Tratamento da imagem de profundidade (4.3), onde são expostos os passos 2, 3 e 4, Segmentação do Fuste (4.4), que explica o processo do passo 5, Reta de inclinação do fuste (4.5), explica o item 6, Localizando as alturas de interesse (4.6), passo 6 e Calculando os diâmetros (4.7), que propriamente expõe as técnicas dos passos restantes.

4.2 Captura da imagem de profundidade

Para captura das imagens de profundidade, foi desenvolvido um sistema que tem como base utilização da câmera de profundidade Microsoft Kinect. Visando a mobilidade do sistema, optou-se por utilizar um computador portátil, devido à necessidade de testes em campo onde é difícil a existência de fontes de energia elétrica. Outro componente adaptado a esta característica foi o Microsoft Kinect que tem necessidade de alimentação de uma fonte de energia. Neste caso, o dispositivo, foi adaptado a uma pequena bateria recarregável 12V de capacidade 8000mAh (Figura 4.2), cuja autonomia supera a 10 horas

de uso contínuo. Um tripé de câmera, com auxílio de adaptador foi utilizado para fixar o Microsoft Kinect.



Figura 4.2: Bateria utilizada no sistema.

Para elaboração dos algoritmos, foi utilizada a biblioteca de programação PrimeSense OpenNI, que foi configurada para captura da imagem de profundidade e RGB na resolução 640x480 pixels, a uma taxa de 30 quadros por segundo. Um protótipo de captura de imagens foi desenvolvido e sua interface gráfica pode ser observado na Figura 4.3.

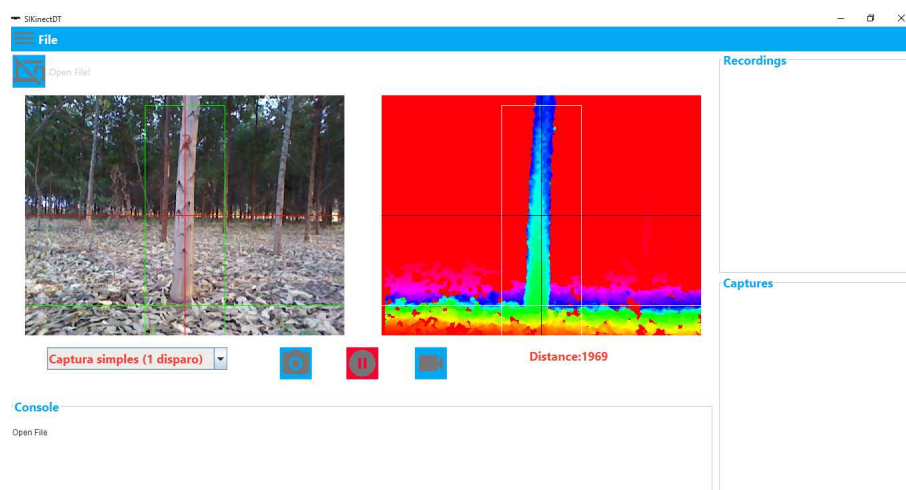
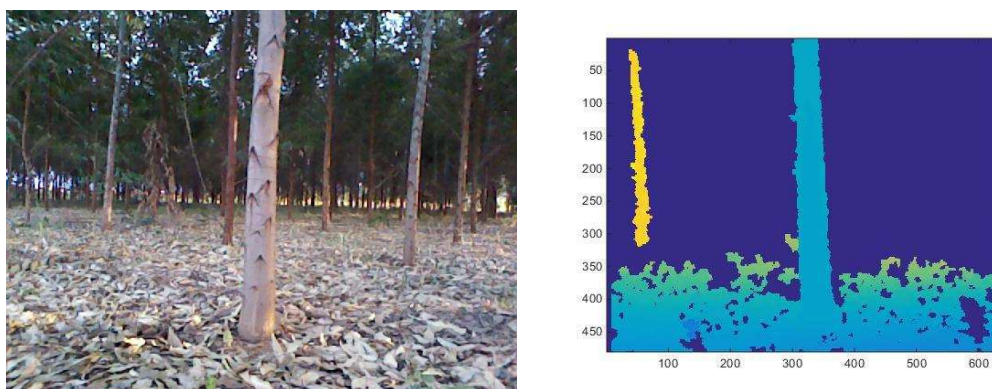


Figura 4.3: Interface gráfica do protótipo.

A interface gráfica, é composta na parte central por dois campos onde são projetadas a imagens RGB e a imagem de profundidade, onde a profundidade é convertida em escala de cores. Nesses campos onde a imagem é projetada, foi adicionado um sistema

de mira, que serve como referência para a árvore de interesse. Outros componentes foram colocados, com funcionalidades de controle da captura e com a finalidade de mostrar informações do funcionamento do protótipo.

Inicialmente, optou-se apenas por trabalhar com os dados de profundidade obtidos pelo Kinect que foram salvas em arquivos binários e catalogadas, com referências de cada árvore. As imagens RGB foram armazenadas para posterior utilização, se necessário. Uma cena de exemplo obtida pelo sistema de uma árvore de eucalipto pode ser visualizada na Figura 4.4, sendo a captura de imagem RGB na Figura 4.4(a) e o mapa de profundidade representado na Figura 4.4(b).



(a) *Perspetiva de visão da cena obtida pelo Microsoft Kinect.* (b) *Visualização do mapa de profundidade em RGB.*

Figura 4.4: *Exemplo de imagens de uma cena.*

4.3 Tratamento da imagem de profundidade

O tratamento dos dados de profundidade devem levar em consideração a topologia do ambiente de floresta, e as características do plantio, bem como informações a serem coletadas. Neste passo, pretendem-se eliminar dados desnecessários e que venham a dificultar a extração do diâmetro das árvores de eucalipto nas imagens de profundidade.

As imagens de profundidade obtidas com o Kinect apresentam falhas que, em sua maioria, são resultantes de interferência de grande quantidade de luz no ambiente. A Figura 4.5 mostra um exemplo de imagem de profundidade com falhas, obtida pelo protótipo.

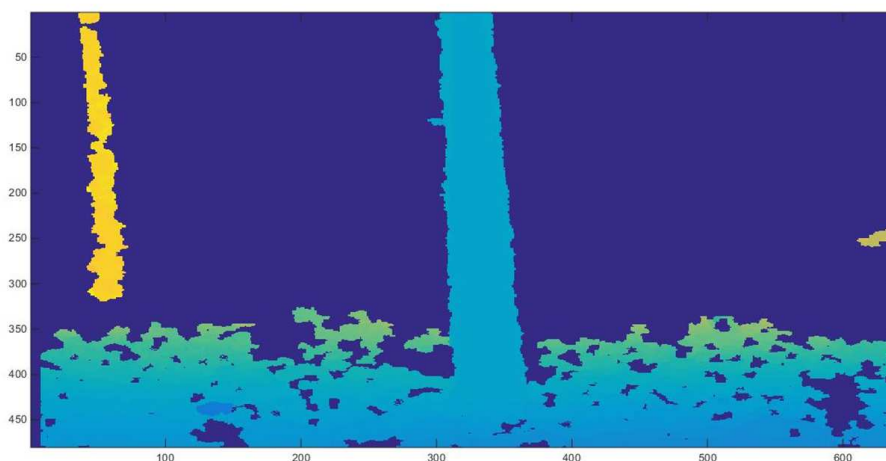


Figura 4.5: *Imagem de profundidade com falhas.*

Foi observado que em condições onde não há incidência de luz diretamente sobre a cena, as falhas não se apresentam como ruídos, que acontecem com certa frequência. Para solucionar o problema das falhas na imagem de profundidade foram utilizadas várias imagens da mesma cena, tiradas em sequência. Uma nova imagem foi gerada em que cada pixel é a moda dos pixels na mesma posição nas imagens originais. A Figura 4.6 mostra um esquema simplificado do processamento.

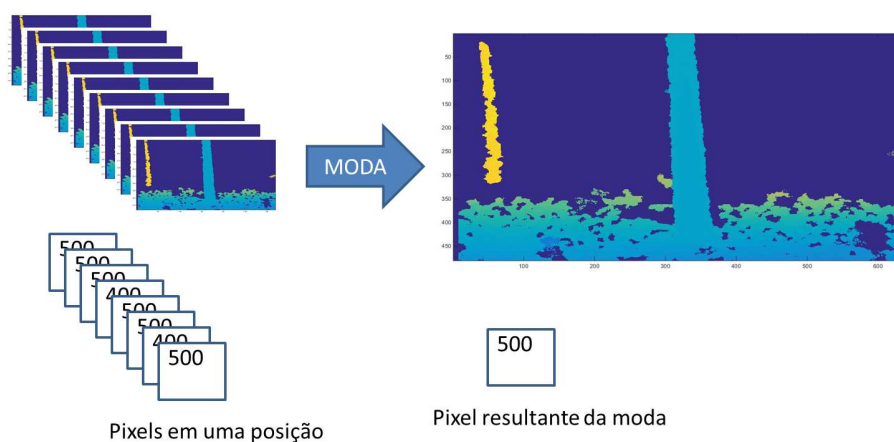


Figura 4.6: Esquema que expressa o uso da moda nas imagens.

Foram utilizadas 15 imagens de cada cena para ter um resultado satisfatório, ao aplicar a moda .

O solo é uma parte da cena de grande importância, tanto para a segmentação do fuste, quanto para o cálculo das alturas a serem consideradas. Para a detecção dessa porção da imagem de profundidade, o diagrama da Figura 4.7 ilustra as principais atividades.

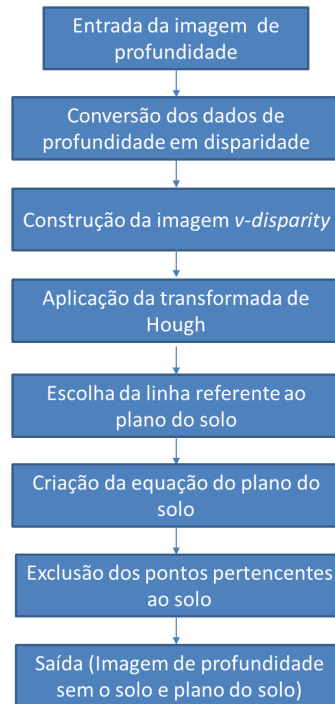


Figura 4.7: Diagrama geral de atividades para detecção do solo

A técnica fundamental do esquema é chamada *v-disparity* e vem sendo usado em diversos trabalhos que utilizam câmeras estéreo e também foi recurso de projetos envolvendo o Kinect para a detecção de chão (ROUGIER et al., 2011). Este processo depende basicamente da informação de disparidade de uma imagem de profundidade. O Kinect utiliza da mesma característica das câmeras estéreo, o que permite obter a disparidade a partir dos dados de profundidade.

Foi utilizada para a conversão dos dados de profundidade para disparidades a equação 4-1.

$$disparidade = \frac{B \cdot f}{Z} \quad (4-1)$$

Sendo que:

- B é a distância entre as câmeras, que é de 7,5cm;
- f é a distância focal da câmera, que é de 580 pixels;
- Z é a profundidade do pixel (ROUGIER et al., 2011).

A técnica *v-disparity* consiste na em gerar uma imagem resultante do histograma de linhas dos dados de disparidade, como pode ser observada na Figura 4.8.

A linha correspondente aos pixels de chão no mapa do *v-disparity* foi extraído utilizando a transformada de Hough. A linha representando o chão, pode ser encontrada assumindo que as imagens são capturadas em ambiente ao ar livre. O método utilizado para escolha da linha é uma técnica que calcula a distância de todos os pontos da imagem

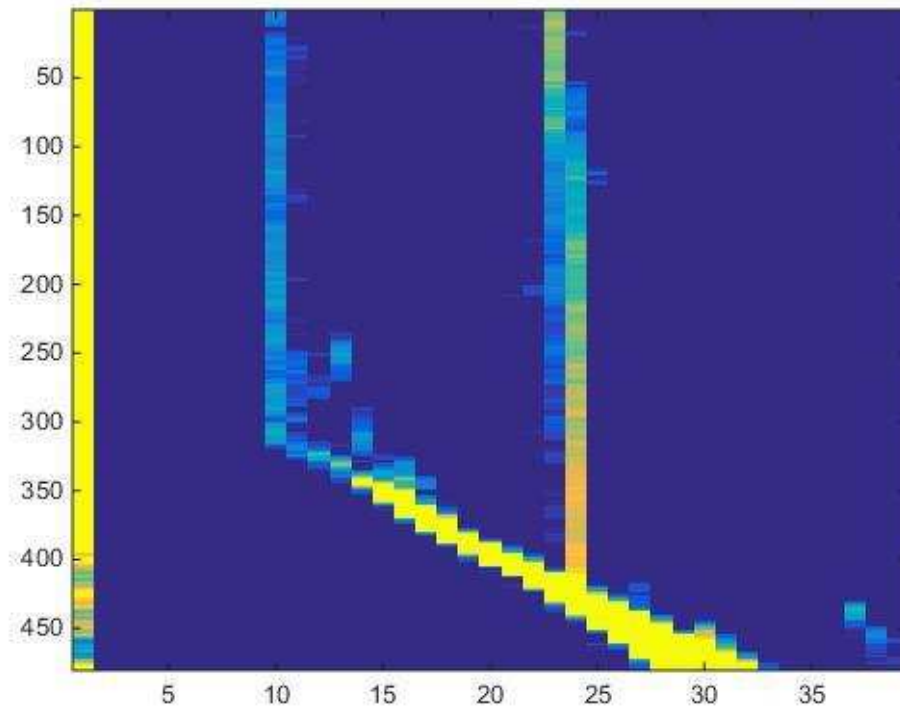


Figura 4.8: *Imagem v-disparity*

v-disparity a cada linha encontrada na transformada de Hough e, assim, aquela linha que tiver menor distância para a maioria dos pontos é escolhida como a de referência para o plano do chão. A técnica foi escolhida devido à sua independência do conhecimento da altura e ângulo do sensor em relação ao solo e é uma solução utilizada em ambientes abertos como as cenas em questão neste trabalho. Na Figura 4.9, podemos ver um exemplo de linha extraída das imagens *v-disparity*, que foram obtidos com base em imagens adquiridas em ambiente de floresta plantada.

Esses dados são fundamentais para gerar a função do plano do solo dada pela equação 4-2:

$$x_n \cdot x + y_n \cdot y + z_n \cdot z = d \quad (4-2)$$

Onde:

- x_n, y_n, z_n são as coordenadas normais do plano e podem ser obtidos calculando os mínimos quadrados com os pontos da linha;
- d a deslocamento do plano da origem das coordenadas.

A partir da equação do plano, podem ser obtidas as distâncias entre um ponto e o plano descrito pela Equação 4-3 (DALGE, 2001).

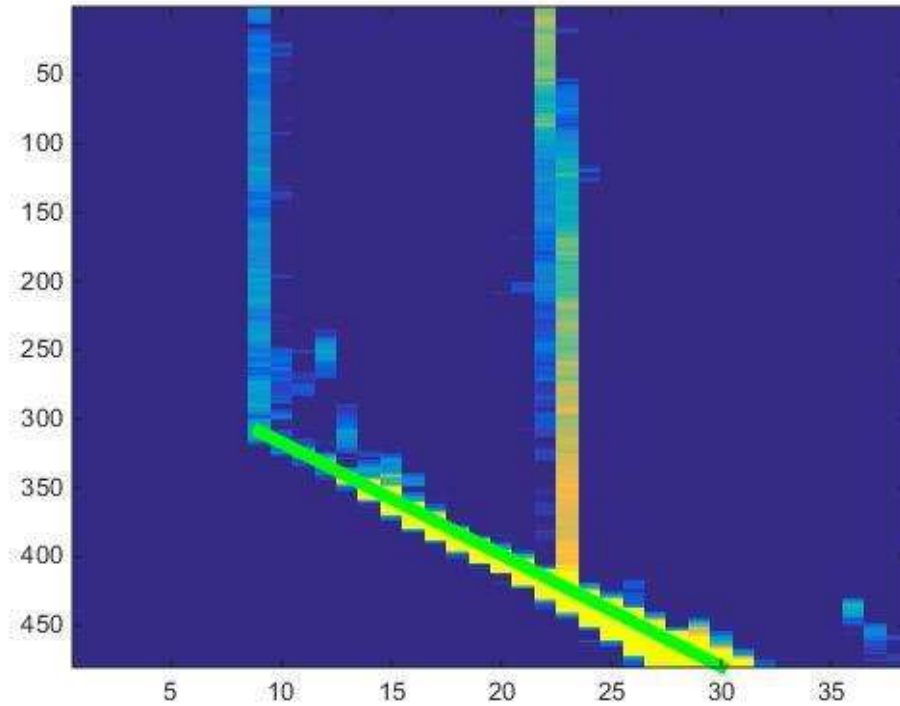


Figura 4.9: Imagem v-disparity com linha representando o plano do solo

$$\overline{P_0, \pi} = \frac{|x_n \cdot x + y_n \cdot y + z_n \cdot z - d|}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2}} \quad (4-3)$$

Em que $\overline{P_0, \pi}$ é definido como a distância do ponto P_0 ao plano π .

Para determinar quais pontos são considerados como solo, todos os pontos da imagem de profundidade são aplicados na Equação de distância de um ponto a um plano (Equação 4-3). Para que pontos que não estão exatamente no plano e façam parte do chão sejam excluídos, uma tolerância 0,25 metros foi considerada para distância, garantindo que a altura de 0,3m do plano não seja compreendida como chão. Os pontos da imagem de profundidade equivalente ao plano do chão são desconsiderados para que a cena seja simplificada, auxiliando na segmentação do fuste.

Para simplificar e eliminar dados desnecessários no mapa de profundidade, foram desconsiderados os valores que superassem 0,5 metros, além da distância obtida no ponto referente à mira da interface gráfica do protótipo. A imagem resultante de todo processo pode ser observada na Figura 4.10.

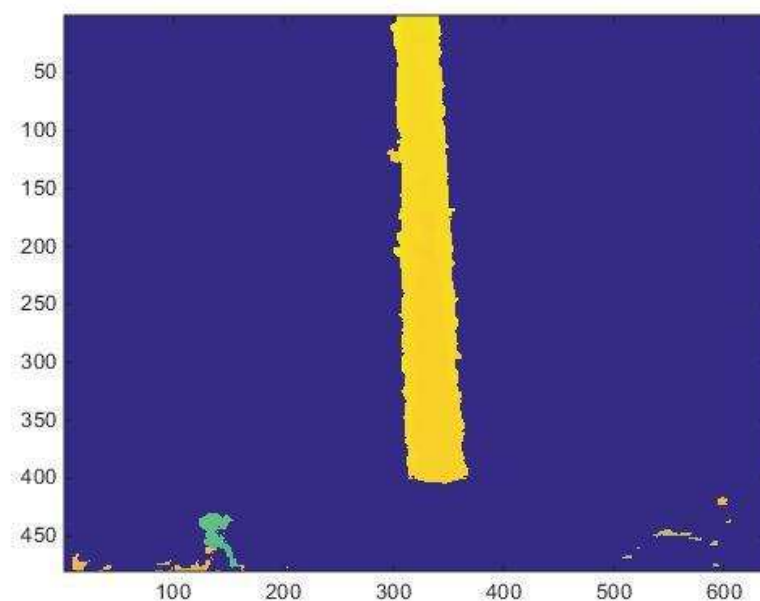


Figura 4.10: *Exemplo de mapa de profundidade de uma árvore depois de passar pelo processo de tratamento descrito.*

4.4 Segmentação do fuste

Para segmentação do fuste da imagem de profundidade, primeiramente foi aplicado um algoritmo de detecção de componentes conexos, no qual se buscam partes da imagem que estão conectadas. Para determinar estes componentes foi aplicado a técnica de rotulação *Raster – scan*, que realiza uma varredura de imagem em uma direção, etiquetando os pixels com o rótulo de seus vizinhos. Se o pixel não é conectado, um novo rótulo é atribuído (HE; CHAO; SUZUKI, 2008). O algoritmo de rotulação utilizado é análogo ao do algoritmo 4.1.

Algoritmo 4.1: *Rotulao*(A, n, m)

Entrada: matriz $A[x_1 \dots x_n][y_1 \dots y_m]$, inteiro n , inteiro m , inteiros não negativos $x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_m, n$ e m .

Saída: matriz $A[x_1 \dots x_n][y_1 \dots y_m]$ rotulada.

```

1  rotulo  $\leftarrow$  1.
2   $i \leftarrow$  1.
3   $j \leftarrow$  1.
4  repita
5      repita
6          se ( $A[i][j] \neq 0$ ) então
7              se Existe vizinho rotulado então
8                   $A[i][j] \leftarrow$  menor rotulo dos vizinhos.
9              senão
10                  $rotulo \leftarrow rotulo + 1.$ 
11                  $A[i][j] \leftarrow rotulo.$ 
12             fim
13         fim
14          $j \leftarrow j + 1.$ 
15     até ( $j = m$ )
16      $i \leftarrow i + 1.$ 
17 até ( $i = n$ )

```

A análise dos pixels vizinhos no algoritmo de rotulação pode ser feita com vizinhança 4 ou 8. Neste trabalho, foi utilizada a vizinhança de 8 como pode ser observada na Figura 4.11.

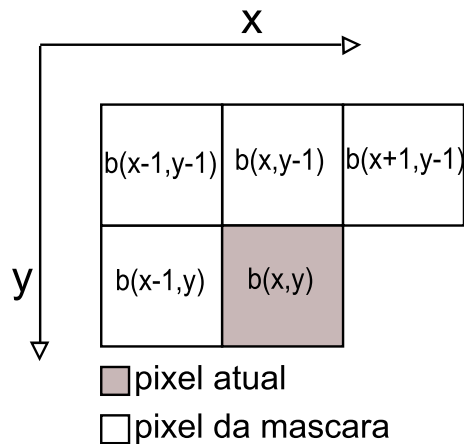


Figura 4.11: Esquema de análise de vizinhança 8.

O algoritmo de rotulação, como descrito, não garante que os componentes da imagem tenham mesmo rótulo. Para a solução deste problema, existe a chamada técnica de duas passagens ou duas varreduras. Essa técnica armazena as etiquetas que são encontradas e, em seguida, as etiquetas provisórias são substituídas pela menor etiqueta equivalente, com o uso da segunda varredura (HE; CHAO; SUZUKI, 2008).

O método empregado desconsidera os pontos que não possuem profundidade, resultando em um mapa de rótulos. Deste mapa, é apenas considerado o rótulo que está no ponto referente à mira da interface gráfica do protótipo, que é correspondente à árvore de interesse. São desconsiderados quaisquer outros componentes da imagem. O mapa resultante serve para determinar os pontos de interesse da imagem de profundidade. Um exemplo pode ser observado na Figura 4.12.

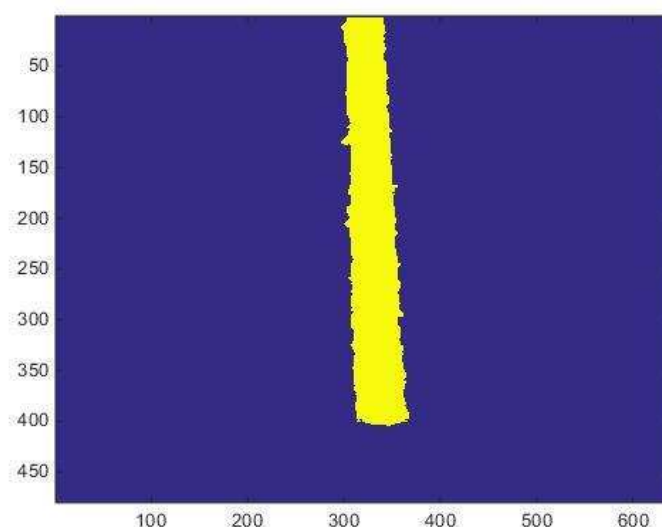


Figura 4.12: Exemplo de mapa de profundidade de uma árvore após rotulação.

4.5 Reta de inclinação do fuste

Com fuste da árvore segmentado, um dado importante para a solução no problema abordado é a inclinação do fuste. Este dado se faz necessário devido a inclinação do terreno, a variações na posição do Kinect e a própria inclinação do fuste em relação ao solo.

O modelo de regressão linear, segundo Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009), é um dos modelos causais mais conhecidos e utilizados, que consiste de uma variável chamada de dependente estar relacionada a uma ou mais variáveis independentes por uma equação linear. Pode-se dizer, em uma linguagem técnica, que a linha de regressão

minimiza os desvios quadrados dos dados reais. Para determinar a inclinação da árvore de interesse, foi utilizada a equação de regressão linear equação 4-4:

$$Y_i = \alpha + \beta \cdot X_i + \varepsilon_i \quad (4-4)$$

Na equação 4-4:

- Y_i refere-se à variável dependente;
- X_i à variável independente;
- α representa interseção da linha no eixo y; e
- β inclinação da linha.

Esta fórmula estabelece a equação que identifica o efeito da variável de previsão (variável independente) sobre a demanda do produto em análise (variável dependente), isso porque se busca prever a demanda de determinado item com base na previsão de outra variável que tenha relação com tal item. Em outras palavras, tem por objetivo encontrar uma equação linear de previsão de modo que a soma dos quadrados dos erros de previsão (ε_i) seja a mínima possível. Para se encontrarem os valores de α e β , segue a fórmula conforme descreve Gaither e Frazier (2001) (Equação 4-5):

$$\alpha = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \beta = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4-5)$$

Onde:

- n é o número de pontos; e
- x e y , são as coordenadas de cada ponto;

Os pontos do mapa de rótulos são utilizados na equação, que irá determinar os parâmetros de uma reta que representa a orientação dos pontos e a inclinação do fuste da árvore. A equação pode ser expressa como uma equação de reta comum (Equação 4-6).

$$y = m \cdot x + b \quad (4-6)$$

Sendo:

- y refere-se a variável dependente;
- x é a variável independente;
- m é o coeficiente angular; e
- b é a interseção da reta no eixo y.

A reta de inclinação pode ser observada na Figura 4.13 onde é representada pela linha em verde.

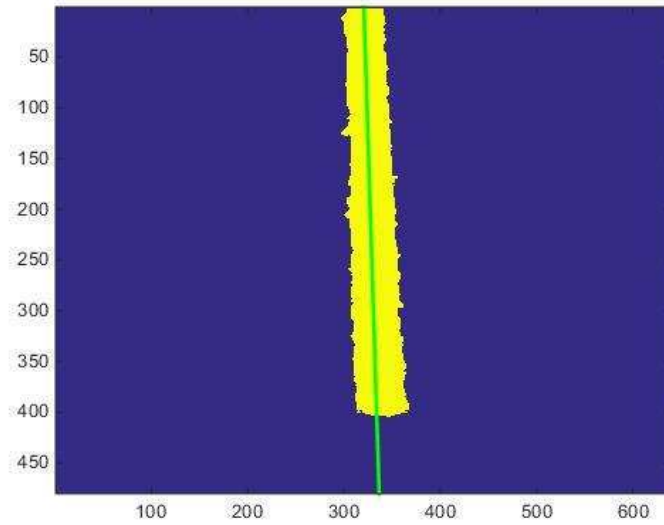


Figura 4.13: *Reta de inclinação de uma amostra visualizada em um exemplo de imagem de profundidade.*

4.6 Localizando as alturas de interesse

Para que os diâmetros de interesse fossem obtidos dada à equação da reta de inclinação, foram encontrados os pontos referentes à alturas de $H_{0,3}$, $H_{0,7}$ e $H_{1,3}$ é necessário que coordenadas X e Y de cada pixel da imagem de profundidade sejam convertidas para coordenadas de mundo dadas pelas Equação 4-7:

$$X_m = (X - x_0) \frac{f_x}{Z} \quad Y_m = (Y - y_0) \frac{f_y}{Z} \quad (4-7)$$

Na equação:

- X_m e Y_m , são as coordenadas de mundo;
- X e Y , são as coordenadas de projeção;
- x_0 e y_0 , são as coordenadas de projeção da origem;
- Z é a profundidade; e
- f_x e f_y , são comprimento focal da câmera profundidade no eixo x e y (FENG et al., 2012).

Segundo Feng et al. (2012), a Equação 4-7 tem precisão de de um milímetro.

Para determinar essas alturas, foi definido um algoritmo que percorre os pontos pertencentes a reta de inclinação iniciando da extremidade inferior da imagem. Até que seja encontrado o primeiro ponto que seja também pertencente ao fuste segmentado. A partir desse ponto, são calculadas as distâncias para os pontos pertencentes à reta de inclinação, ao plano do solo (Equação 4-3).

Calculando as distâncias de todos os pontos pertencentes a reta de inclinação e ao fuste da árvore segmentada, até o plano do chão, são encontrados os pontos que mais se aproximam das alturas de interesse. Os pontos dos quais a sua distância estiverem mais próximas das alturas de interesse são tomados como referência para $H_{0,3}$, $H_{0,7}$ e $H_{1,3}$. Na Figura 4.14, podemos ver uma representação das alturas indicadas pelas retas em azul.

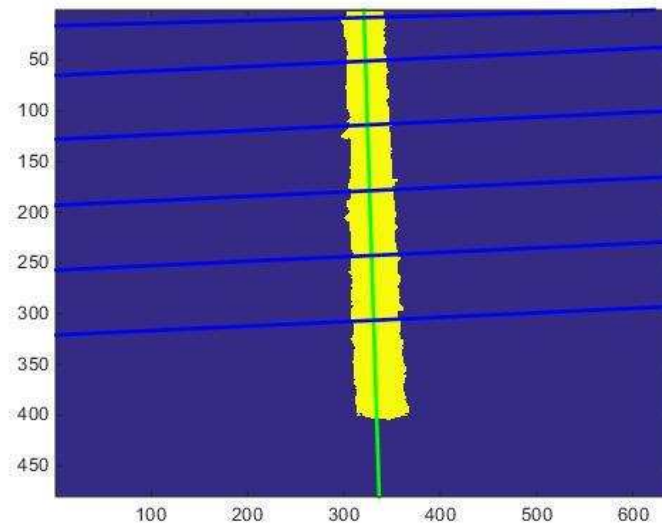


Figura 4.14: Exemplo de retas das alturas de interesse.

4.7 Calculando os diâmetros

Com os pontos referentes às alturas, foram geradas equações das retas perpendiculares à reta de inclinação e que passam por esses pontos que representam as alturas de interesse. Para isso, foi utilizada a relação das retas perpendiculares para se obterem as novas equações. Essa relação pode ser descrita pela Equação 4-8:

$$m_p = -\frac{1}{m} \quad (4-8)$$

Sendo:

- m_p é a coeficiente angular de r_1 , r_2 e r_3 ; e
- m é o coeficiente angular de R_i .

As equações das retas r_1 , r_2 e r_3 seguem o mesmo padrão da equação 4-6.

A partir dessas retas, foram encontrados os pontos extremos P_a e P_b da reta r_1 , P_c e P_d da reta r_2 e P_e e P_f da reta r_3 na imagem de profundidade do fuste. Os extremos são encontrados a partir de uma varredura buscando o primeiro e o último, nos pontos de cada reta, que também pertença ao fuste da árvore. Esses pontos de cada reta já convertidos para

coordenadas de mundo seguindo a equação 4-7, e posteriormente aplicados a equação euclidiana (Equação 4-9) obtendo os diâmetros de interesse.

$$D_i = \sqrt{(X_m^a - X_m^b)^2 + (Y_m^a - Y_m^b)^2 + (Z^a - Z^b)^2} \quad (4-9)$$

Onde:

- D_i é a diâmetro de interesse;
- X_m^a e Y_m^a , são as coordenadas de mundo do primeiro ponto; e
- X_m^b e Y_m^b , são as coordenadas de mundo do ultimo ponto (SOTOMAYOR, 1979).

É conhecido que os diâmetros tendem a diminuir progressivamente com a altura e, como discutido no Capítulo 2, as medições de diâmetro devem evitar deformidades no fuste das árvores. Para evitar as deformidades no fuste, a abordagem do modelo proposto é toma o diâmetro $D_{0,3}$ como referência para os outros diâmetros. Caso os diâmetros superiores a $D_{0,3}$ sejam maiores que o anterior um novo ponto, acima deste é selecionado como referência e são refeitas as etapas para cálculo do diâmetro. Essa altura superior foi limitada à metade da amplitude da altura entre os diâmetros de interesse.

4.8 Verificação das funcionalidades da aplicação

O modelo proposto foi implementado em um protótipo para verificar e validar o método. O sistema, primeiramente, faz a captura dos dados de profundidade e já os trata conforme descrito neste capítulo. Nos testes realizados, foram encontrados problemas em alguns horários do dia, quanto a iluminação no interior de uma floresta, interferindo na captura das imagens. Entretanto, aquelas árvores nos limites da área plantada os dados de profundidade apresentaram ruído intenso por conta da luz natural. A vegetação e folhas próximas às árvores representaram um perda de dados não significativa por conta da limpeza ao redor da base da árvore e não teve impacto na primeira medida de interesse.

O algoritmo de segmentação no solo não apresentou nenhuma falha na geração ou seleção do plano equivalente em todas as amostras. Parte da vegetação permaneceu na imagem de profundidade devido a sua altura ser superior ao limiar de aceitação para pertencer ao plano. No processo de rotulação do mapa de profundidade, os pontos que não pertencem a árvore foram eliminados em todos os testes, bem como a geração da reta de inclinação obteve resultados satisfatórios.

Para as alturas, os testes foram realizados marcando-se a superfície da árvore nas respectivas alturas e conferidas manualmente por meio de instrumentos de medição e programas de edição de imagem. Nessa situação, o sistema apresentou erros absolutos entre 1 e 8mm para as alturas, sendo que esses erros, geralmente, são apresentados na altura de 0,3m e propagados para as posteriores.

Na estimativa de diâmetros foram realizados testes com rigor a fim de validar o modelo proposto na obtenção dos diâmetros.

4.9 Cálculo dos erros dos diâmetros estimados

Com a finalidade de verificar o comportamento do modelo no cálculo dos diâmetros de cada árvore, foram utilizados o Root Mean Square Error (RMSE), o viés (*Bias*) a correlação linear (*R*), Análise de variância (ANOVA) (ÖZÇELİK et al., 2010). Nos trabalhos apresentados por Vastaranta et al. (2008), Melkas et al. (2008), Shimizu et al. (2014) um dos principais índices de precisão calculados foi o Erro Padrão (S_e), descritos por eles como resultado da Equação 4-10.

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[(y_i^a - y_i^e) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^a - y_i^e) \right]^2} \quad (4-10)$$

Onde:

- y^a - vetor dos diâmetros reais;
- y^e - vetor dos diâmetros estimados;
- n - número de medidas de diâmetros estimadas a partir do modelo.

O vies (*Bias*), Equação 4-11, é definido como a diferença entre a média de um conjunto de medidas estimatidas e seu valores de reais. Pode indicar uma tendência do erro nas estimativas.

$$Bias\% = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^e - \sum_{i=1}^n y_i^a}{\sum_{i=1}^n y_i^a} 100 \quad (4-11)$$

Root Mean Square Error (RMSE), Equação 4-12, mostra as diferenças individuais entre a previsão do modelo (p_n) e as observações (o_n), onde n é o total de comparações. Elevando as diferenças ao quadrado força a tratar igualmente os resultados negativos e positivos. Mede o erro total (sistemáticos e randômicos). É utilizado para medir a magnitude do erro.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^N (p_n - o_n)^2} \quad RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{y}^a} 100 \quad (4-12)$$

Onde $\bar{y}^a$ é valor médio do diâmetro de referência.

Entende-se por correlação linear (r), o grau de associação entre duas variáveis aleatórias (Equação 4-13). A dependência de duas variáveis x e y é dada pelo coeficiente de correlação amostral. O r pode ser interpretado por seu valor, sendo que acima de 0,6 indica uma correlação forte, entre 0,3 a 0,6 indica moderada e de 0 a 0,3 fraca correlação.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i^a - \bar{y}_i^a)(y_i^e - \bar{e}_i^a)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(y_i^a - \bar{y}_i^a)^2] \sum_{i=1}^n [(y_i^e - \bar{e}_i^e)^2]}} \quad (4-13)$$

Onde $\bar{y}^a$ é valor médio do diâmetro estimado.

Com a finalidade de verificar se ocorrem diferenças estatísticas de acuidade entre os diâmetros estimados pelo modelo proposto e o método tradicional foi realizada uma análise de variância (ANOVA). ANOVA é a técnica estatística para estudar as diferenças significativas entre duas ou mais populações.

Na ANOVA foi definida como hipótese nula (H_0) que não existem diferenças estatísticas entre os métodos que estão sendo analisados. Quando a probabilidade (p) encontrada é menor do que 0,05, a hipótese nula (H_0) da ANOVA pode ser rejeitada, portanto podemos afirmar que existem diferenças estatísticas entre os métodos.

A utilização de uma ANOVA depende que os dados estudados possuam independência e normalidade de resíduos e "homogeneidade" (igualdade) de variâncias. Para a realização da ANOVA foram realizadas as verificações de hipóteses com os testes de Lilliefors e Cochran, que produzem uma probabilidade (p) para indicar se há normalidade e homogeneidade de variâncias. Nos testes realizados, o valor de (p) encontrado para os testes de Lilliefors e Cochran foram inferiores a (0,05) revelando normalidade e homogeneidade de variâncias. Como os métodos comparados são completamente diferentes, foi respeitado o princípio da randomização, não sendo necessário verificar a independência dos casos. Assim, a ANOVA pode ser usada na análise dos experimentos.

A ANOVA foi realizada entre os diâmetros medidos utilizando o método tradicional, e estimado usando o método proposto.

4.9.1 Cálculos dos volumes das árvores a partir dos diâmetros estimados e utilizando as equações volumétricas

Com o objetivo de observar a eficiência do modelo proposto neste trabalho, foram calculados os volumes da base das árvores a partir do método de Smalian, conforme as Equação 4-14, também apresentada no Capítulo 2.

$$V = L \cdot \frac{(g_1 + g_2)}{2} \quad (4-14)$$

Onde:

- L - Comprimento da seção;
- g_1 - área seccional da extremidade inferior da seção;
- g_2 - área seccional da extremidade superior da seção.

Esses volumes foram comparados com os respectivos volumes calculados a partir dos diâmetros medidos diretamente das árvores com o método tradicional. A comparação

não será aprofundada devido serem calculados volumes apenas da base, onde foram realizadas as medições deste trabalho.

4.10 Considerações Finais Deste Capítulo

Este capítulo apresentou o modelo proposto neste trabalho. Foi apresentado o conjunto de técnicas aplicadas nas diversas etapas do método, além de como foram verificadas seus passos. Foram também apresentados métodos estatísticos usados para validar o modelo proposto.

O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos na estimativa de diâmetros utilizando o modelo deste trabalho e comparando os resultados com os obtidos em trabalhos relacionados.

Resultados Obtidos

5.1 Introdução

O método proposto foi elaborado e resultou em uma aplicação que, inicialmente, foi testada em ambiente controlado para verificação de suas funcionalidades. Com esta etapa concluída, novos testes foram feitos para medir o desempenho do modelo, e os resultados serão apresentados ao longo deste capítulo.

5.2 Dados

A área onde foram coletados os dados para este estudo é de propriedade de uma empresa de gestão de ativos florestais, localizada no município de Turmalina, no estado de Minas Gerais. O clima na região é tropical. Há muito menos pluviosidade no inverno que no verão. A classificação do clima é AW, segundo a Koppen e Geiger. A temperatura média é 21,9° C. A média anual de pluviosidade é de 955 mm.

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos em um talhão retangular, coletados aleatoriamente em um sítio florestal plantado com clones de eucalipto com idade de 11 anos, com espaçamento de 3x3 metros. A coleta foi realizada após as 16 horas e 30 minutos e se estendeu até as 20 horas do mesmo dia, pelas condições de luz natural que deve ser baixa para o bom funcionamento do Kinect. Foram coletados dados de 24 árvores amostras, sendo agrupadas em oito classes diamétricas, para controle da forma da árvore, contendo em cada classe 3 indivíduos (Tabela 5.1).

Na coleta de dados, o solo foi limpo próximo às árvores e realizada a desrama de galhos remanescente na base do fuste. Foram medidos com suta, os diâmetros nas alturas 0,30; 0,50; 0,70; 0,90; 1,10; 1,30 metros em relação ao solo. Foram adicionadas à coleta de dados a medição das alturas 0,50; 0,90 e 1,10 metros, além das propostas no método, a fim de obter número maior de dados para a comparação entre diâmetros medidos e estimados. Durante o processo, foram obtidas os dados de profundidade das árvores em duas posições, sendo uma na direção das linhas de plantio e a outra perpendicular a essa.

Tabela 5.1: *Classes de diâmetro das árvores amostras*

DAP	Min.	Max.	Média	Desvio Padrão
7,5 ┤ 9,5	7,1	9,1	8,1	1,0
9,5 ┤ 11,5	10,1	11,5	10,7	0,7
11,5 ┤ 13,5	12,5	13,3	12,8	0,5
13,5 ┤ 15,5	14,1	15,1	14,5	0,5
15,5 ┤ 17,5	16,2	17,3	16,7	0,6
17,5 ┤ 19,5	17,5	18,7	18,0	0,6
19,5 ┤ 21,5	19,5	21,1	20,2	0,8
21,5 ┤ 23,5	22,1	22,3	22,2	0,1

Dados em cm.

O Kinect foi posicionado a uma distância entre 1,5 e 2 m de distância da árvore, a uma altura de aproximadamente um metro em relação ao solo.

Os dados de cada amostra foram georreferenciados e atribuídos com um número, além de cada árvore ser marcada com tinta *spray* para que uma equipe da empresa proprietária da área identificasse as árvores para que, posteriormente, fossem cubados.

Os dados, então, foram tabulados e calculados separando as amostras em classes conforme Tabela 5.1. Os diâmetros resultantes de cada amostra foram calculados utilizando média geométrica (Equação 5-1) com as duas medidas aferidas com suta e em cada altura e com cada valor obtido com a aplicação nas duas posições perpendiculares.

$$D_i = \sqrt{m_i \cdot m_i'} \quad (5-1)$$

Onde,

- D_i é o diâmetro de interesse; e
- m_i , o diâmetro um posição;
- m_i' , diâmetro perpendicular a primeira posição.

5.3 Comparação entre os diâmetros das árvores calculados utilizando suta e os estimados pelo modelo proposto

Com as imagens de profundidade de cada árvore foram calculados os diâmetros utilizando o modelo proposto. O mesma regra de duas medidas com suta foi seguida pelo modelo e, com as duas estimativas, foi calculada a média geométrica (Equação 5-1) entre elas, e essa foi assumida como o diâmetro estimado.

É conhecido que mesmo que, a suta seja um método preciso para a medição de diâmetros, mas podem existir erros. Estudos anteriores, mostraram que o erro padrão de

um suta metálica varia entre 2,7 e 6,9 mm (VASTARANTA et al., 2008). Considerando esse erro padrão da suta de 2,7mm, e que esse é o método de referência podemos observar na Figura 5.1 que os erros obtidos com o modelo proposto estão bem próximos à esse valor.

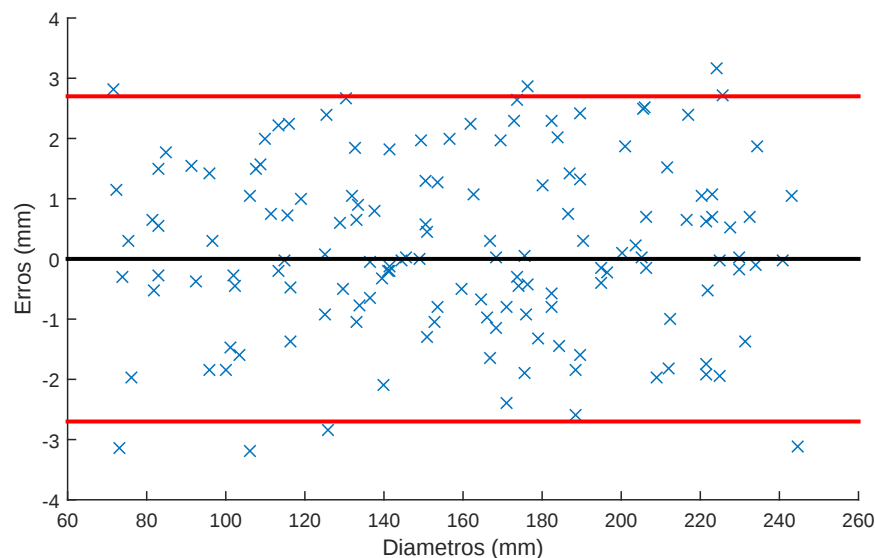


Figura 5.1: Diagrama dos diâmetros medidos com suta por erros da diferença entre diâmetro medido e estimado.

Na Figura 5.1 se pode observar que a maioria dos erros encontra-se inferior ao erro padrão da suta (linha em vermelho). Entenda-se na Figura, como erro, a diferença entre o diâmetro estimado e o medido com suta. As linhas em vermelho mostram o limites para o erro padrão da suta.

A equação para calculo do erro padrão utilizada por Vastaranta et al. (2008), Melkas et al. (2008), Shimizu et al. (2014), obteve para o modelo proposto neste trabalho o valor de 2,05 mm. O trabalho de Vastaranta et al. (2008) apresenta para o método *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) o menor erro padrão de todos os observados na revisão bibliográfica, sendo o valor de 8,31mm, e considerando o erro padrão da suta de 4,46mm. Comparando o valor do erro padrão obtido neste trabalho ao observados em trabalhos relacionais, pode-se considerar que, mesmo sem descontar o erro padrão da suta, esse índice é consideravelmente menor. E, caso seja considerado o erro padrão da suta, o resultado desta pesquisa mostra que não são observadas diferenças numéricas entre os diâmetros medidos e estimados.

O *Bias%* foi calculado utilizando como entrada todos os diâmetros medidos e estimados. Foi observado no estudo que o viés ficou em 0,11%. Os melhores resultados observados para *Bias* nos trabalhos relacionados foi apresentado no trabalho Vastaranta et al. (2008), que foi de 0,05%. Embora usando mesmo método, o estudo apresenta viés de 0,09% e 2,08 para outras espécies de árvores.

Os resultados dos erros RMSE% em milímetros foram resumidos na Tabela 5.2, com a finalidade de mostrar os erros máximos e mínimos de cada classe com suas respectivas médias e desvio padrão, em relação aos obtidos com o modelo e seus valores medidos.

Tabela 5.2: RMSE% por Classe

DAP	RMSE%			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
7,5 ┤ 9,5	1,25	2,66	1,78	0,77
9,5 ┤ 11,5	0,67	1,99	1,22	0,69
11,5 ┤ 13,5	0,87	1,31	1,05	0,24
13,5 ┤ 15,5	0,51	0,89	0,68	0,19
15,5 ┤ 17,5	0,76	0,97	0,86	0,11
17,5 ┤ 19,5	0,77	0,90	0,84	0,07
19,5 ┤ 21,5	0,61	0,81	0,68	0,11
21,5 ┤ 23,5	0,50	0,87	0,67	0,18

Os RMSE% ficaram entre 0,5% e 2,66%, sendo a classe de DAP 7,5 ┤ 9,5 com maior média(1,78%)e desvio padrão(0,77%). O menor RMSE% pertence à classe de DAP 21,5 ┤ 23,5 e respectivamente a menor média(0,67%). O menor desvio padrão (0,07%) é observado na classe de DAP 17,5 ┤ 19,5. Era esperado que o RMSE% seria menor para classes superiores pela razão entre o erro e o diâmetro. A única classe que destoia deste padrão é a classe de DAP 13,5 ┤ 15,5.

Os resultados observados do RMSE% no trabalho de Soares (2012), variam entre 0,41% e 20,57%, com desvio padrão máximo de de 9,13%. Apesar de não poderem ser comparados como métodos relacionados, os valores obtidos na estimativa do modelo proposto neste trabalho possuem menor variação entre RMSE% mínimo e máximo.

A correlação linear foi calculada por árvore e organizada por classes e pode ser observado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Correlação linear por classe

DAP	Correlação	
	Mínimo	Máximo
7,5 ┤ 9,5	0,3436	0,9269
9,5 ┤ 11,5	0,9308	0,9865
11,5 ┤ 13,5	0,8779	0,9720
13,5 ┤ 15,5	0,9338	0,9945
15,5 ┤ 17,5	0,9436	0,9662
17,5 ┤ 19,5	0,9412	0,9717
19,5 ┤ 21,5	0,9726	0,9957
21,5 ┤ 23,5	0,9716	0,9900

Com o objetivo de visualizar a correlação entre todos os diâmetros medidos com suta e estimados, o diagrama de dispersão esta apresentado na Figura 5.2.

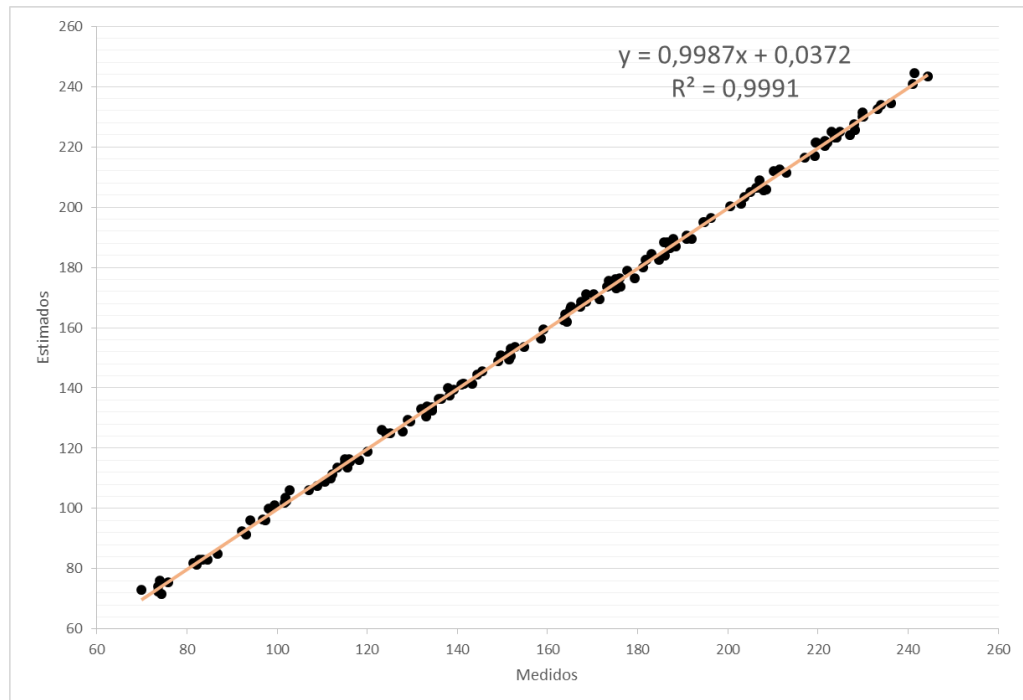


Figura 5.2: Diagrama de dispersão de todos os diâmetros.

Podemos observar que a correlação linear apresentou o menor valor de 0,3436 observada na classe de DAP 7,5 ─ 9,5 e o maior de 0,9957 na classe de DAP 19,5 ─ 21,5. Excluindo a menor das correlações que foi obtida, todos os outros valores calculados para a correlação podem ser considerados fortes ficando entre 0,8779 e 0,9957. No diagrama de dispersão as variáveis diâmetro medido e estimada indicam coeficiente de regressão linear e coeficiente de determinação (R^2) muito próximos a 1, indicando boa relação entre as variáveis.

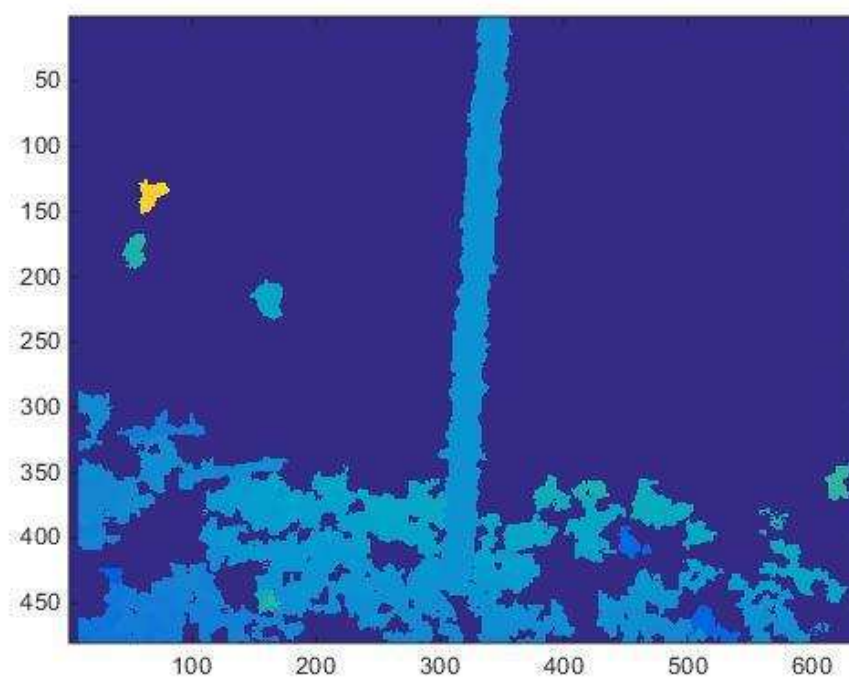
Somente em uma das árvores a correlação foi da moderada próxima a fraca, sendo identificada pela segunda árvore medida em campo, mostrando na Figura 5.3 a sua imagem RGB e de profundidade.

Na Figura 5.3 pode-se observar na imagem (a) que a incidência de luz solar ao longo do fuste, prejudicou a qualidade dos dados de profundidade (b) pelas características do dispositivo Kinect e deve ser considerado como um problema do dispositivo, não como um erro de medição.

A ANOVA realizada para os conjuntos, diâmetros medidos e estimados apresentou o valor de $p = 0,974534$. A hipótese nula (H_0) foi aceita, ou seja não existem diferenças estatísticas significativas entre os diâmetros medidos com suta e os obtidos pelo método em estudo.



(a) *Imagem RGB*



(b) *Mapa de profundidade*

Figura 5.3: *Imagens obtidas na segunda árvore.*

5.4 Comparação entre os volumes das árvores calculados utilizando os diâmetros medidos com suta e os estimados pelo modelo proposto

O volume das árvores é um dos principais dados obtidos na realização do inventário florestal. A proposta deste trabalho está relacionada a estimativas de diâmetros, mas com objetivo de verificar um impacto inicial do modelo no cálculo de volumes, foi calculado o volume da base das árvores com os diâmetros obtidos na amostra.

Os volumes foram calculados individualmente para cada árvore entre as alturas de 0,3m e 1,3m utilizando a Equação de Smalian. Com a finalidade de resumir os resultados, a Tabela 5.4 mostra a diferença entre volumes calculados com os diâmetros medidos e estimados.

Tabela 5.4: *Diferença absoluta (%) entre os volumes por classe*

DAP	Diferença absoluta(%) entre V^m e V^e	
	Mínimo	Máximo
7,5 ┤ 9,5	0,13%	0,59%
9,5 ┤ 11,5	0,14%	1,24%
11,5 ┤ 13,5	0,04%	0,49%
13,5 ┤ 15,5	0,19%	0,34%
15,5 ┤ 17,5	0,06%	0,26%
17,5 ┤ 19,5	0,14%	0,34%
19,5 ┤ 21,5	0,27%	0,33%
21,5 ┤ 23,5	0,08%	0,30%

Onde:

- V^m - volume utilizando os diâmetros medidos com suta; e
- V^e - volume utilizando os diâmetros estimados pelo modelo proposto.

As diferenças entre os volumes ficaram entre 0,04% e 1,24%, tendo a classe de DAP 7,5 ┤ 9,5 com a menor diferença. A classe de DAP 9,5 ┤ 11,5 teve a maior diferença, 1,27%. No geral, somando todos os volumes calculados, a diferença entre os volumes fica em 0,15%, sendo que, com os diâmetros estimados foi obtido um volume total maior. Os resultados foram considerados satisfatórios, uma vez que, não foi observada diferença significativa entre o método de medição tradicional e o método proposto.

5.5 Considerações Finais Deste Capítulo

Este capítulo descreveu os dados utilizados para testes e os resultados obtidos. Foi apresentado o conjunto de resultados estatísticos comparando os diâmetros medidos com suta e os estimados com o modelo proposto. Foram comparados os resultados com os obtidos em trabalhos relacionados.

O próximo capítulo apresenta as conclusões gerais deste trabalho e possíveis trabalhos futuros.

Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

6.1 Introdução

Este capítulo apresenta as conclusões e as contribuições deste trabalho e os trabalhos futuros.

6.2 Conclusões e Contribuições

Várias pesquisas se dispõem ao desenvolvimento de métodos para a análise das características da forma das árvores e modelos para acelerar e facilitar os inventários florestais. Diversos são os trabalhos que propõem modelos para ajustar as equações para a predição dos diâmetros. Estes trabalhos têm abordado técnicas para precisão e cálculo do volume. Algumas abordagens novas para a coleta de dados em campo foram observadas nos trabalhos pesquisados, sendo que ainda dependem de alguma intervenção ou perícia humana para estimar os diâmetros de árvores.

É importante ressaltar que muitas das técnicas para se fazer o inventário florestal necessitam de uma quantidade de amostras muito grande do povoamento e que resulta em um abate prematuro de árvores, e um custo muito alto do procedimento de inventário. Alguns modelos tentam minimizar esses custos fazendo o inventário com a árvore em pé, mas ainda dependem de pelo menos algumas medidas dos diâmetros.

Um dos modelos estudados é utiliza *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) que faz a captura dos padrões de profundidade de uma cena. Este é um dispositivo de alto custo, que possui bastante precisão. Além do custo elevado, essa abordagem depende de perícia humana para marcar os diâmetros de interesse. Outras abordagens foram observadas com custo um pouco menor que o TLS. Contudo, ainda são dependentes de calibração, ajustes e ainda da experiência do operador.

Este trabalho visa, então, minimizar os problemas encontrados na medição dos diâmetros, seja para evitar erros, quanto agilizar o processo de inventário e diminuir custo. A principal contribuição deste trabalho, e o modelo aqui proposto aliado a técnicas de

trabalhos já existentes, pode simplificar a atividade de inventário florestal em campo. Nesta proposta, desenvolveu-se um sistema de baixo custo, com possibilidades de aplicar seu uso em campo. Assim, a base do modelo proposto é a estimativa dos diâmetros das árvores utilizando câmeras de profundidade. Essas medidas são os diâmetros a 0,3; 0,7 e 1,3 metros do solo.

O desempenho do modelo foi comparado a metodologia tradicional de medição de diâmetros com suta. Para avaliar o método, diâmetros a 0,5; 0,9 e 1,1 metros do solo também foram comparados. Foram realizadas as comparações dos resultados obtidos por meio do erro padrão, raiz do erro quadrático médio, correlação linear e viés (*Bias*). O método pode ser utilizado para a medição de vários diâmetros da base da árvore com uma única imagem de profundidade.

Em todos os testes realizados, podem-se observar resultados bastante satisfatórios em comparação aos valores dos diâmetros medidos com suta. Porém, há problemas em relação a interferência de luz no dispositivo de captura das imagens de profundidade. Isso já era esperado, devido a características do próprio dispositivo utilizado e não do modelo proposto. Erros na estimativa da altura de 0,3 metros são repassados para os cálculos dos próximos diâmetros. No entanto, essa diferença influenciou muito pouco nos diâmetros observados de cada árvore.

Nos testes realizados, verificou-se que as diferenças entre os diâmetros estimados pelo modelo e os medidos com suta foram muito pequenas. Não se pode dizer que há diferenças significativas entre o método proposto e o tradicional. Pode-se observar que os resultados de estimativa do modelo deste trabalho foi considerado melhor do que outros trabalhos relacionados em vários índices de desempenho, embora esses façam estimativas de espécies de árvores diferentes da estudada.

No uso do modelo, a estimativa dos diâmetros apresentou resultados satisfatórios, tanto comparada a métodos tradicionais quanto para as abordagens que também façam estimativas dos diâmetros. Esse modelo, além de reduzir significativamente o custo e o tempo de realização de um inventário, está ainda, menos sujeito a erros humanos. Assim, o modelo mostrou que pode ser utilizado para auxiliar os inventários florestais em estimar diâmetros com precisão

6.3 Trabalhos Futuros

Ao concluir o trabalho, pode-se observar que diversos novos problemas podem ser abordados. Com esta visão, trabalhos futuros podem se guiar pelas seguintes linhas:

- Implementar o modelo, utilizando outros dispositivos de captura de imagem de profundidade, incluindo dispositivos móveis;

- desenvolver e testar o modelo, para prever outros diâmetros de árvores usando informações da base;
- testar os modelos propostos com outras situações de campo e espécies de árvores para verificar a sua capacidade de generalização; e
- desenvolver e testar um modelo para prever as alturas de árvores usando informações da base obtidas com o método proposto, especialmente a altura total e a altura do diâmetro mínimo comercial.

Referências Bibliográficas

ABRAF. *Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012*. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 1980|8550.

ALFENAS, A. C. et al. *Clonagem e doenças do eucalipto*. [S.l.]: UFV, 2004.

ANDRADE, V. C. L. D.; CALEGARIO, N.; SCOLFORO, J. R. S. Análise de algumas alternativas para obter o coeficiente angular da reta no método da altura relativa. *Ciência Florestal*, v. 16, n. 3, p. 303–317, 2006.

ARAÚJO, E. J. G. de et al. Relações dendrométricas em fragmentos de povoamentos de pinus, em minas gerais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 32, n. 72, p. 355, 2012.

ATIQUEZZAMAN, M.; AKHTAR, M. W. A robust hough transform technique for complete line segment description. *Real-Time Imaging*, Elsevier, v. 1, n. 6, p. 419–426, 1995.

BARBALHO, V. M. de S. *Sistemas baseados em Conhecimento e lógica Difusa Para Simulação do Processo Chuva-vazão*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2001.

BLAIS, F. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*, v. 13, n. 1, 2004.

BONETES, L. *Tamanho de parcelas e intensidade amostral para estimar o estoque e índices fitossociológicos em uma Floresta Ombrófila Mista*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2003.

BRANDELERO, C. et al. Tecnologia móvel utilizada no inventário florestal. *FLORESTA*, v. 38, n. 4, p. 727–734, 2008.

CABACINHA, C. D. *Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras., 2003.

CAMPOS, J. C. C.; JÚNIOR, T. L. T.; NETO, F. de P. Ainda, sobre a seleção de equações de volume1. *Revista Árvore*, Sociedade de Investigações Florestais, v. 9, n. 2, p. 115, 1985.

CYGANEK, B.; SIEBERT, J. P. *An introduction to 3D computer vision techniques and algorithms*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

DALGE, J. C. L. Cartografia para geoprocessamento. *Introdução à ciência da geoinformação*. São José dos Campos: INPE, p. 32, 2001.

- DIAMANTOPOULOU, M. Tree-bole volume estimation on standing pine trees using cascade correlation artificial neural network models. International Commission of Agricultural Engineering, 2006.
- DROESCHEL, D.; STÜCKLER, J.; BEHNKE, S. Learning to interpret pointing gestures with a time-of-flight camera. In: ACM. *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction*. [S.l.], 2011. p. 481–488.
- EL-LAITHY, R. A.; HUANG, J.; YEH, M. Study on the use of microsoft kinect for robotics applications. In: IEEE. *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION*. [S.l.], 2012. p. 1280–1288.
- FAO, A. O. O. T. U. N. *Manual of forest inventory, with special reference to mixed tropical forest*. [S.l.: s.n.], 1973.
- FENG, Z. et al. Real-time fingertip tracking and detection using kinect depth sensor for a new writing-in-the air system. In: ACM. *Proceedings of the 4th International Conference on Internet Multimedia Computing and Service*. [S.l.], 2012. p. 70–74.
- FORSYTH, D. A.; PONCE, J. *Computer vision: a modern approach*. [S.l.]: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.
- FRANCO, E. *Estudo dos métodos estimativos de volume, biomassa e níveis de produtividade para Eucalyptus camaldulensis*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras. UFLA, 1996.
- FRATI, V.; PRATTICIZZO, D. Using kinect for hand tracking and rendering in wearable haptics. In: *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 317–321.
- FREITAG, Â. S. Frequências de irrigação para eucalyptus grandis e pinus elliottii em viveiro. *Santa Maria: UFSM*, v. 60, 2007.
- GAITHER, N.; FRAZIER, G. *Administração da produção e operações*. [S.l.]: Pioneira Thomson Learning, 2001.
- GILES, J. Inside the race to hack the kinect. *New Scientist*, Elsevier, v. 208, n. 2789, p. 22–23, 2010.
- GOMES, A. Medição dos arvoredos, 413 pp. *Sá da Costa, Lisboa*, 1957.
- HE, L.; CHAO, Y.; SUZUKI, K. A run-based two-scan labeling algorithm. *Image Processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 17, n. 5, p. 749–756, 2008.
- HOSOKAWA, R.; SOUZA, A. Amostragem para fins de manejo. *Curso de Manejo Florestal. Brasília-DF*, v. 5, 1987.
- JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. O setor florestal no brasil ea importância do reflorestamento. BNDES, Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social, 2002.
- KOLB, A. et al. Time-of-flight sensors in computer graphics. In: *Proc. Eurographics (State-of-the-Art Report)*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 119–134.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. Administração de produção e operações. São Paulo: Person Prentice, 2009.

LAAR, A. V.; AKCA, A. *Forest mensuration*. 2. ed., completely rev. and supplemented. ed. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. (Managing forest ecosystems, v. 13). ISBN 978-1-4020-5990-2.

LABAYRADE, R.; AUBERT, D.; TAREL, J.-P. Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through "v-disparity" representation. In: IEEE. *Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE*. [S.l.], 2002. v. 2, p. 646–651.

LABELLE, K. Evaluation of kinect joint tracking for clinical and in-home stroke rehabilitation tools. *Undergraduate Thesis, University of Notre Dame*, 2011.

LITOMISKY, K. *Consumer RGB-D Cameras and their Applications*. [S.l.], 2012.

LULIO, L. C. *Técnicas de visão computacional aplicadas ao reconhecimento de cenas naturais e locomoção autônoma em robôs agrícolas móveis*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

MAYER, R. *Scientific Canadian: Invention and Innovation from Canada's National Research Council*. [S.l.]: Raincoast Books, 1999. 192 p.

MELKAS, T. et al. Accuracy and efficiency of the laser-camera. *Proceedings of SilviLaser*, 2008.

MOLYNEAUX, D. Kinectfusion rapid 3d reconstruction and interaction with microsoft kinect. In: ACM. *Proceedings of the International Conference on the Foundations of Digital Games*. [S.l.], 2012. p. 3–3.

MORGENROTH, J.; GOMEZ, C. Assessment of tree structure using a 3d image analysis technique? a proof of concept. *Urban Forestry & Urban Greening*, Elsevier, v. 13, n. 1, p. 198–203, 2014.

MURARKA, A.; SRIDHARAN, M.; KUIPERS, B. Detecting obstacles and drop-offs using stereo and motion cues for safe local motion. In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 702–708.

NETO, E. X. d. P. *Detecção de gestos manuais utilizando câmeras de profundidade*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.

ÖZÇELİK, R. et al. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in turkey. *Journal of environmental management*, Elsevier, v. 91, n. 3, p. 742–753, 2010.

PAULA, J. E. de. Anatomia e dendrometria de mimosa artemisiana e eucalyptus grandis. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 30, n. 6, p. 745–757, 1995.

RAVEN, P.; EVERT, R.; EICHHORN, S. *Biologia Vegetal*. [S.l.]: Editora Guanabara Koogan SA, Rio de Janeiro, 2007.

- ROCHA, J. C. d. O. Influência da seca de ponteiros na seleção de modelos volumétricos para eucalyptus camaldulensis e eucalyptus citriodora. Universidade Federal de Viçosa, 1992.
- ROGERS, R. Kinect with linux. *Linux Journal*, Belltown Media, v. 2011, n. 207, p. 6, 2011.
- ROUGIER, C. et al. Fall detection from depth map video sequences. In: *Toward useful services for elderly and people with disabilities*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 121–128.
- SCOLFORO, J. Biometria florestal: Parte i: modelos de regressão linear e não-linear; parte ii: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento, e peso de matéria seca. *Lavras: UFLA/FAEPE*, 2005.
- SHIMIZU, A. et al. Diameter measurements of the upper parts of trees using an ultra-telephoto digital photography system. *Open Journal of Forestry*, Scientific Research Publishing, v. 4, n. 04, p. 316, 2014.
- SILVA, J. d.; NETO, F. d. P. Princípios básicos de dendrometria. *Imprensa Universitária da UFRPE. Universidade Federal Rural de Pernambuco*, 1979.
- SILVA, R. M. de A. et al. Fuzzy and neuro-fuzzy estimates of the total height of eucalyptus trees. In: ACM. *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing*. [S.l.], 2008. p. 1772–1776.
- SOARES, C. P. B.; NETO, F. d. P.; SOUZA, A. L. d. *Dendrometria e inventário florestal*. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2011. 272 p. ISBN 9788572694131.
- SOARES, F. A. A. d. M. N. *Predição recursiva de diâmetros de clones de eucalipto utilizando rede Perceptron de múltiplas camadas para o cálculo de volume*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- SOTOMAYOR, J. *Li, cães de equa, cães diferenciais ordinárias*. [S.l.]: Instituto de Matemática Pura e Aplicada, CNPq, 1979.
- SUN, G. et al. Predicting tree height and biomass from glas data. In: *10th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. [S.l.: s.n.], 2007.
- THOMAS, C. et al. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. *Ciência Florestal*, v. 16, n. 3, p. 319–327, 2006.
- VASTARANTA, M. et al. Comparison of different laser-based methods to measure stem diameter. *Proceedings of the SilviLaser*, 2008.
- VCP, V. C. e P. *Sustainable growth with value creation and solid returns*. [S.l.], 2004.
- VIEIRA, R. Pequenos objetos de madeira de eucalyptus: possibilidade de aproveitamento de resíduo. Universidade Federal de Lavras, 2006.
- WANG, J. Y. Imaging laser radar-an overview. In: *Lasers' 86; Proceedings of the Ninth International Conference on Lasers and Applications*. [S.l.: s.n.], 1987. v. 1, p. 19–29.
- WEST, P. W.; WEST, P. W. *Tree and forest measurement*. [S.l.]: Springer, 2009.

XIÃO, R.; CARANDE, R.; GHIGLIA, D. A neural network approach for tree height estimation using ifsar data. In: IEEE. *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS'98. 1998 IEEE International*. [S.l.], 1998. v. 3, p. 1565–1567.

YANG, C. et al. V-disparity based ugv obstacle detection in rough outdoor terrain. *Acta Automatica Sinica*, Elsevier, v. 36, n. 5, p. 667–673, 2010.

ZALEVSKY, Z. et al. *Method and system for object reconstruction*. [S.l.]: Google Patents, mar. 19 2013. US Patent 8,400,494.

ZHANG, Z. Microsoft kinect sensor and its effect. *MultiMedia, IEEE*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 4–10, 2012.

ZHAO, J.; KATUPITIYA, J.; WARD, J. Global correlation based ground plane estimation using v-disparity image. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 529–534.