

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA

JOÃO VICTOR DO NASCIMENTO LIMA

**CÁLCULO DE VOLUME MADEIREIRO DE *EUCALYPTUS* A PARTIR DE
ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA COM APLICAÇÃO DE *LASER SCANNER*
*TERRESTRE***

MONTE CARMELO

2023

JOÃO VICTOR DO NASCIMENTO LIMA

**CÁLCULO DE VOLUME MADEIREIRO DE *EUCALYPTUS* A PARTIR DE
ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA COM APLICAÇÃO DE *LASER SCANNER*
*TERRESTRE***

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Instituto de Geografia da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Agrimensura e
Cartográfica.

Área de concentração: Topografia e
Mensuração Florestal

Orientador: Prof^o. Dr. George Deroco Martins

Coorientador: Prof^o. Dr. Álvaro Augusto
Vieira Soares

Avaliador: Prof.^o Dr. Ricardo Luis Barbosa

MONTE CARMELO

2023

AGRADECIMENTOS

Em todas as crises e evolução da humanidade, sempre precisamos agradecer principalmente a todos aqueles que sempre nos ajudaram. Durante cinco anos de estudo e aprendizado longe de casa, gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuiu para que eu pudesse chegar até aqui.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pela minha vida, pela vida de meus Pais, de minha família e por todas as bençãos que me concedeu durante a minha vida, e principalmente durante a minha graduação. Ficar longe de casa não é fácil e sem ele eu não teria conseguido.

Segundamente, gostaria de agradecer aos meus Pais, Humberto Paula Lima e Ângela Maria Silva do Nascimento, que sempre me deram apoio em tudo que eu queria fazer, sempre priorizou minha educação e que eu fosse um homem melhor a cada dia. Obrigado Pai e Mãe, sem vocês eu não seria nada, eu me sinto orgulhoso e sortudo de ser filhos de vocês, amo vocês.

Terceiramente gostaria de agradecer aos meus irmãos, Paulo Junior do Nascimento Lima e Ayrton Vannuti do Nascimento Lima, que me proporcionaram conversar e forças para que eu pudesse seguir em frente.

Agradecimentos também as minhas tias Shirley Silva e Yana Lima, por todo o carinho, cuidado e conselhos me dados.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador de Iniciação Científica e de TCC, George Deroco Martins, por toda a sabedoria e conhecimento transmitidos durante cinco anos de curso. Obrigado professor.

Em especial agradeço a todos os meus amigos que fizeram parte da minha trajetória durante a graduação, e que me proporcionaram conhecimento e descontração dentro e fora da universidade

E agradeço a Universidade Federal de Uberlândia, ao Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, por toda a estrutura e apoio intelectual e técnico. Em especial, gostaria de agradecer ao técnico Valdiney José da Silva, ao professor Vinicius Roffato, ao professor Marcelo Tomio, ao professor Fernando Santil, ao professor Wagner Carrupt, e a professora Luziane Indjai.

*“Não importa o que digam ou pensem, alcançaremos nossos objetivos com aquele
que nos protege”*

Jacques DeMolay

RESUMO

A quantificação do volume de madeira é uma etapa crítica do gerenciamento da produção madeireira. O volume de madeira é uma variável base para diversas tomadas de decisões como a prescrição e avaliação de tratamentos silviculturais, planejamento da colheita, dimensionamento de suprimentos, entre outros. Portanto, a quantificação acurada do volume de madeira é imprescindível para o manejo eficiente de área florestal. Diversas metodologias de quantificação foram desenvolvidas desde os primórdios da sistematização da produção florestal. Mais recentemente, a varredura a *laser* vem sendo empregada na mensuração florestal como uma potencial metodologia, que facilitará e reduzirá o tempo de medição com acurácia igual ou mesmo superior ao procedimento tradicional do inventário florestal tradicional. Um de *Laser Scanner* Terrestre (TLS) é uma tecnologia que vem sendo utilizada para fazer um perfilamento e a obtenção de dados tridimensionais do fuste das árvores e consequentemente cálculo de volume. Tendo isso exposto o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de técnicas de medições indiretas baseadas em sensores remotos ativos (LiDAR) na obtenção de dados tridimensionais para o cálculo de volume madeireiro de eucaliptos. As análises de dados foram consideradas que o volume obtido pelo método da cubagem rigorosa (Volumes reais), e pelo método indireto (Volume predito). Para análise da acurácia da varredura a laser foram realizados cálculos estatísticos como RMSE, RMSE%, desvio padrão e correlação entre os volumes medidos. A ETR conseguiu realizar medições de diâmetro no DAP a uma precisão menor que 10% utilizando a nuvem de pontos em estado bruto, ou seja, sem a geração de superfície do fuste. Além disso, houve correlação de 0,761 entre os volumes obtidos entre cubagem rigorosa e volume pela superfície do fuste.

Palavra-chaves: Eucalipto, Volume madeireiro, DAP através de medidas indiretas, nuvem de pontos

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - FIGURA ILUSTRATIVA DE CÁLCULO DE SEÇÃO MADEIREIRO.....	16
FIGURA 2 - FIGURA ILUSTRATIVA DO EMPREGO DO MÉTODO DE SMALIAN	18
FIGURA 3 - IMAGEM ILUSTRATIVA DE UM XILOMETRO.....	19
FIGURA 4 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DE EUCALIPTOS.....	21
FIGURA 5 - FOTO DA ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA (ETR) MS50.....	22
FIGURA 6- FOTO DO CONJUNTO, TRIPÉ, BASTÃO CENTIMETRADO E PRISMA.....	22
FIGURA 7 - FOTO DA MALETA COM O PAR DE RECEPTORES GNSS, BASE NIVELANTE E COLETORA.....	23
FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS DE CAMPO E ESCRITÓRIO.....	25
FIGURA 9 – FOTO DA MENSURAÇÃO DA CUBAGEM RIGOROSA	26
FIGURA 10 - FOTO DO MARCO PASSIVO DA REDE GEODÉSICA DO IBGE.....	27
FIGURA 11 - IMAGEM COM O PLANEJAMENTO DE CAMPO.....	28
FIGURA 12 - IMAGEM DO PRISMA EM CAMPO.....	29
FIGURA 13 - IMAGEM DA ETR EM CAMPO.....	30
FIGURA 14 - IMAGEM DO <i>SOFTWARE LEICA INFINITY</i> APÓS O DESCARREGAMENTO DA NUVEM.	
32	
FIGURA 15 – FILTRAGEM PELO <i>SOFTWARE LEICA INFINITY</i> :	33
FIGURA 16 – GERAÇÃO DA SUPERFÍCIE TIN E CÁLCULO DE VOLUME.....	34
FIGURA 17 – MEDIÇÃO DE DIÂMETRO DA SEÇÃO 0,5 M - 1,0 M DA ÁRVORE 1, LINHA 2.....	35
FIGURA 18 – HISTOGRAMA DE AMBAS AS LINHA, LINHA 1 E LINHA 2 DO VOLUME REAL.....	37
FIGURA 19 – GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DO VOLUME REAL	38
FIGURA 20 – HISTOGRAMA DE AMBAS AS LINHA, LINHA 1 E LINHA 2 DO VOLUME ROBÓTICA.....	39
FIGURA 21 – GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DO VOLUME ROBÓTICA	40
FIGURA 22 – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE VOLUME REAL E VOLUME ROBÓTICA.....	41
FIGURA 23 – HISTOGRAMA DO DIÂMETRO REAL E DIÂMETRO DA NUVEM.....	42
FIGURA 24 – GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DO DIÂMETRO REAL	42
FIGURA 25 – GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DO DIÂMETRO DA NUVEM	43
FIGURA 27 – VISTA DE CIMA DA ÁRVORE 12 DA LINHA 1 DA SEÇÃO DE 4,0 M A 4,5 M.....	45
FIGURA 28 – GRÁFICO DE RELAÇÃO ENTRE RMSE% E DIÂMETRO – L1	47

FIGURA 29 – GRÁFICO DE RELAÇÃO ENTRE RMSE% E DIÂMETRO – L2	48
FIGURA 30 – GRÁFICO DE RELAÇÃO ENTRE RMSE% DO VOLUME POR SEÇÃO – L1	50
FIGURA 31 – GRÁFICO DE RELAÇÃO ENTRE RMSE% DO VOLUME E SEÇÃO – L2	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ANÁLISE DE RMSE ENTRE VOLUME REAL E VOLUME DA ROBÓTICA.....	44
TABELA 2 – ANÁLISE DE RMSE ENTRE DIÂMETRO REAL E DIÂMETRO DA NUVEM DE PONTOS – L1	46
TABELA 3 – ANÁLISE DE RMSE ENTRE DIÂMETRO REAL E DIÂMETRO DA NUVEM DE PONTOS – L2	47
TABELA 4 – ANÁLISE DE RMSE ENTRE VOLUME REAL E VOLUME DA NUVEM DE PONTOS (SMALIAN) – L1.....	50
TABELA 5 – ANÁLISE DE RMSE ENTRE VOLUME REAL E VOLUME DA NUVEM DE PONTOS (SMALIAN) – L2.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LASER	<i>Light Amplification by Simulated Emission of Radiation</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
IBGE	Instituto Brasileira de Geografia e Estatística
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ETR	Estação Total Robótica
DAP	Diâmetro à Altura do Peito
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GLONASS	<i>GLObal NAVigational Satellite System</i>
MDS	Modelo Digital de Superfície
CR	Cubagem Rigorosa
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
ICE	<i>Image Composite Editor</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
ARP	<i>Aeronave Remotamente Pilotada</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	JUSTIFICATIVA	15
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
4.1	TÉCNICAS E FÓRMULAS CLÁSSICAS DE MEDIÇÃO DE VOLUME DE FUSTE	16
4.1.1	<i>Cubagem rigorosa</i>	16
4.1.2	<i>Xilometria</i>	18
4.2	USO DE LIDAR PARA MEDIÇÕES DENDROMÉTRICAS.....	19
5	MATERIAL E MÉTODOS	21
5.1	ÁREA DE ESTUDO	21
5.2	MATERIAL	21
5.2.1	<i>ETR MS-50</i>	23
5.2.2	<i>Receptor GNSS</i>	24
5.2.3	<i>Processamento dos dados</i>	24
5.3	MÉTODOS	25
5.4	LEVANTAMENTO DE CAMPO	26
5.4.1	<i>Cubagem Rigorosa</i>	26
5.4.2	<i>Posicionamento RTK</i>	27
5.4.3	<i>Levantamento Topográfico</i>	28
5.5	PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	30
5.5.1	<i>Processamento da Cubagem Rigorosa</i>	30
5.5.2	<i>Processamento da ETR</i>	31
5.5.2.1	<i>Criação de Superfície TIN</i>	31
5.5.2.2	<i>Mensuração dos diâmetros na nuvem de pontos</i>	34
5.6	ANÁLISE DOS DADOS	35
5.6.1	<i>Análise Estatística Descritiva</i>	35
5.6.2	<i>Análise Estatística de RMSE, RMSE%, Desvio Padrão e Correlação</i>	35
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
6.1	ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS DE VOLUME	37
6.2	ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS DE DIÂMETRO.....	41
6.3	ANÁLISE DE RMSE DOS VOLUMES REAL E VOLUME PELA SUPERFÍCIE TIN	44
6.4	ANÁLISE DE RMSE DOS DIÂMETROS REAL E DIÂMETRO MEDIDO NA NUVEM DE PONTOS	46
6.4.1	<i>Linha 1</i>	46

6.4.2	<i>Linha 2</i>	47
6.5	ANÁLISE DE RMSE DOS VOLUMES REAL E VOLUME POR SMALIAN MEDIDO NA NUVEM DE PONTOS	49
6.5.1	<i>Linha 1</i>	49
6.5.2	<i>Linha 2</i>	51
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O volume madeireiro do Brasil tem sua importância desde os tempos da colonização, e até os dias atuais, o Brasil possui um setor importante para a exploração madeireira seja de florestas nativas seja de florestas plantadas. Porém, tem-se a necessidade de potencializar o planejamento e as técnicas para a estimativa de volume para uma forte estruturação do manejo florestal (FIGUEIREDO et al., 2014).

Classicamente dentro do setor de manejo florestal, a cubagem rigorosa é uma das técnicas mais empregadas e clássicas para a medição do volume madeireiro, todavia, esse método traz uma desvantagem que resulta no abatimento da árvore para realização de medições de diâmetro ao longo do fuste, e também outra técnica empregada, é utilização do Criterion para a medição de diâmetro ao longo do fuste, e essa técnica não necessita do abate (derrubada) da árvore, porém a desvantagem é que essa técnica é demorada e onerosa (FLORIANO, 2021)

Além disso, para Fonseca (2018) e Carvalho (2020), o Brasil por ser um dos maiores produtores do mundo em *Eucalyptus*, há uma grande massa de investimento e pesquisa para o setor carvoeiro, papel e celulose, para a criação de tecnologias aplicada à processos de otimização de toda a cadeia de produção. Dentro de tais tecnologias, o Laser(*light amplification by stimulated emission of radiation*) Scanner Terrestre é um exemplo de tecnologia que vem sendo utilizada para fazer um perfilamento e a obtenção de dados tridimensionais(X,Y,Z) do fuste (caule) das árvores e subsequentemente o cálculo de volume madeireiro.

Em estudos como Oliveira et al. (2014) e Del-Campo-Sanchez et al. (2019) mostram que o LiDAR(*light detection and ranging*) embarcados em veículos automotores é capaz de fazer predição de volume madeireiro e caracterização geométricas das árvores. Para Buck et al. (2012) o levantamento a Laser para determinação de volume, por meio de modelagem tridimensional, mostrou-se promissor quando comparado com o método de deslocamento de água(Xilometro). Galhos e folhas formam oclusão para calcular o volume madeireiro por sua totalidade, com isso, as superfícies do tronco que esteja recoberta por galhos e folhas, há diferença estatística em comparação com a cubagem rigorosa.

Nesse sentido as Estações Totais Robóticas (ETR) com a função de laser scanner é uma ferramenta que possui grande potencial, pois ela emprega o controle da precisão durante o levantamento em campo, além de se obter as variáveis dendrométricas automaticamente, como por exemplo, altura do fuste, diâmetro na altura do peito (dap), portanto a inserção do

Sensoriamento Remoto para a evolução da mensuração florestal cumpre a necessidade de medidas precisas e de modelos matemáticos. Porém deve ressaltar também, que as medidas tomadas por laser scanner estão sujeitas a erros meteorológicos, como o vento, pois em uma varredura a árvore pode haver movimento e por consequência acarreta em imprecisão do método (BUCK et al., 2019).

Assim dada à possibilidade que a Estação Total Robótica com aplicação de Laser Scanner terrestre, consegue estimar o volume madeireiro de *Eucalyptus sp.*, a qual o método pode estar correlacionado com o volume por cubagem rigorosa, este trabalho permeou avaliar o potencial do laser scanner terrestre em uma ETR na estimativa volume de *Eucaliptus*.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de técnicas de medições indiretas baseadas em sensor remoto ativo *light detection and ranging* (LiDAR) acoplado em uma estação total robótica (ETR) na obtenção de dados tridimensionais de árvores de *Eucalyptus sp.* e criação de modelos para a quantificação de volume de madeira.

2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram realizados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o potencial da ETR para cálculo de volume;
- Avaliar o potencial da Nuvem de pontos para mensuração de diâmetro.

3 JUSTIFICATIVA

Segundo Marcos Sobrinho et al. (2018), o setor de silvicultura enfrenta uma escassez de técnicas e metodologias que apresentem resultados promissores para a silvicultura de precisão. No entanto, técnicas clássicas como a Cubagem Rigorosa são robustas e bem conceituadas, embora sejam processos que exigem o abate da árvore, acarretando em maiores custos financeiros e exigindo tempo de um profissional qualificado.

O laser scanner terrestre é uma ferramenta de grande utilidade no setor florestal, pois permite reconstruir de forma rápida e precisa a superfície do fuste da árvore. Esse processo ocorre por meio do processamento de nuvens de pontos tridimensionais, o que possibilita a criação de modelos de variáveis dendrométricas (BIENERT et al., 2006a; MAAS et al., 2008 apud MARTINS NETO et al., 2013).

Além disso, para um monitoramento, planejamento e previsão mais eficientes do manejo florestal, é necessário coletar dados de forma rápida para um monitoramento contínuo. No entanto, é preciso aprimorar o planejamento e as técnicas de estimativa de volume a fim de estruturar de maneira sólida o manejo florestal (FIGUEIREDO et al., 2014).

A aplicação de avanços tecnológicos e a integração de técnicas de topografia e sensoriamento remoto possibilitam o monitoramento de variáveis dendrométricas, como o Diâmetro à Altura do Peito (DAP), a altura do fuste e o volume, para realizar o planejamento, controle, previsão e monitoramento das florestas.

Portanto, o interesse comum das empresas florestais e das organizações governamentais de monitoramento é utilizar técnicas que tenham menor custo financeiro e maior previsibilidade durante o manejo.

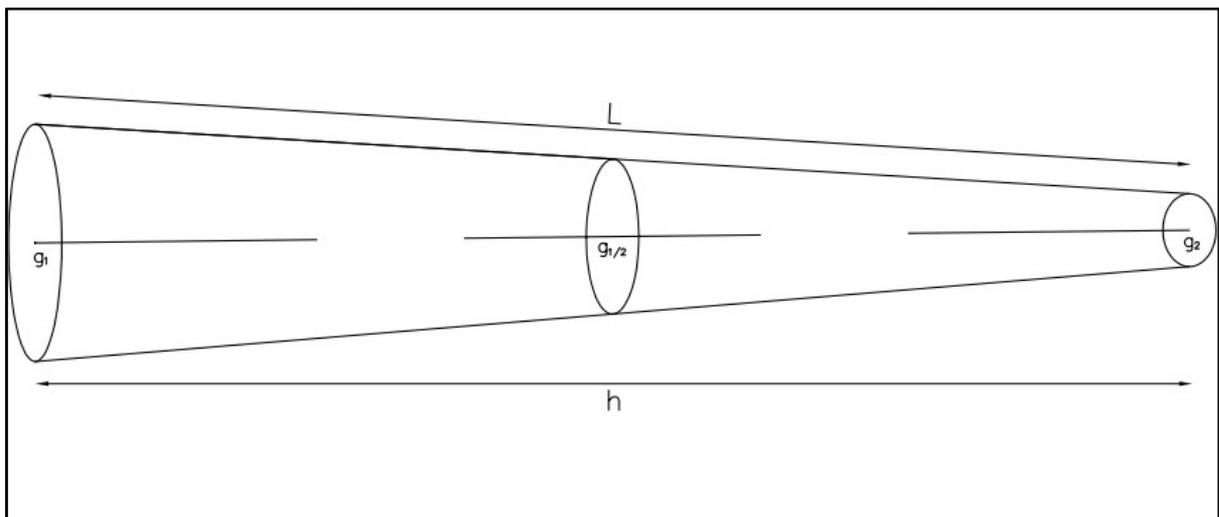
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Técnicas e fórmulas clássicas de medição de volume de fuste

4.1.1 Cubagem rigorosa

É bastante incentivado dentro dos manejos florestais alternativas aproximadas como as fórmulas de Huber, Smalian e de Newton (CAMPOS; LEITE, 2013). Além disso, os dados para a cubagem possuem alta correlação com o diâmetro e com a forma da árvore (CAMPOS; LEITE, 2013). Quando uma árvore é abatida usualmente são feitas as seguintes mensurações e a figura 1 mostra o cálculo de seção madeireiro:

Figura 1 - Figura ilustrativa cálculo de seção madeireiro.



Fonte: O Autor (2023).

Sendo L o comprimento da árvore, g_1 , $g_{1/2}$ e g_2 é a área da seção, e h sendo a altura da árvore. Geralmente é usado o comprimento L da árvore igual a sua altura h , dessa forma pode-se obter volumes madeireiros com as seguintes fórmulas:

- Huber:

$$V = g_{1/2}L \quad (1)$$

- Smalian:

$$V = \left(\frac{g_1 + g_2}{2}\right)L \quad (2)$$

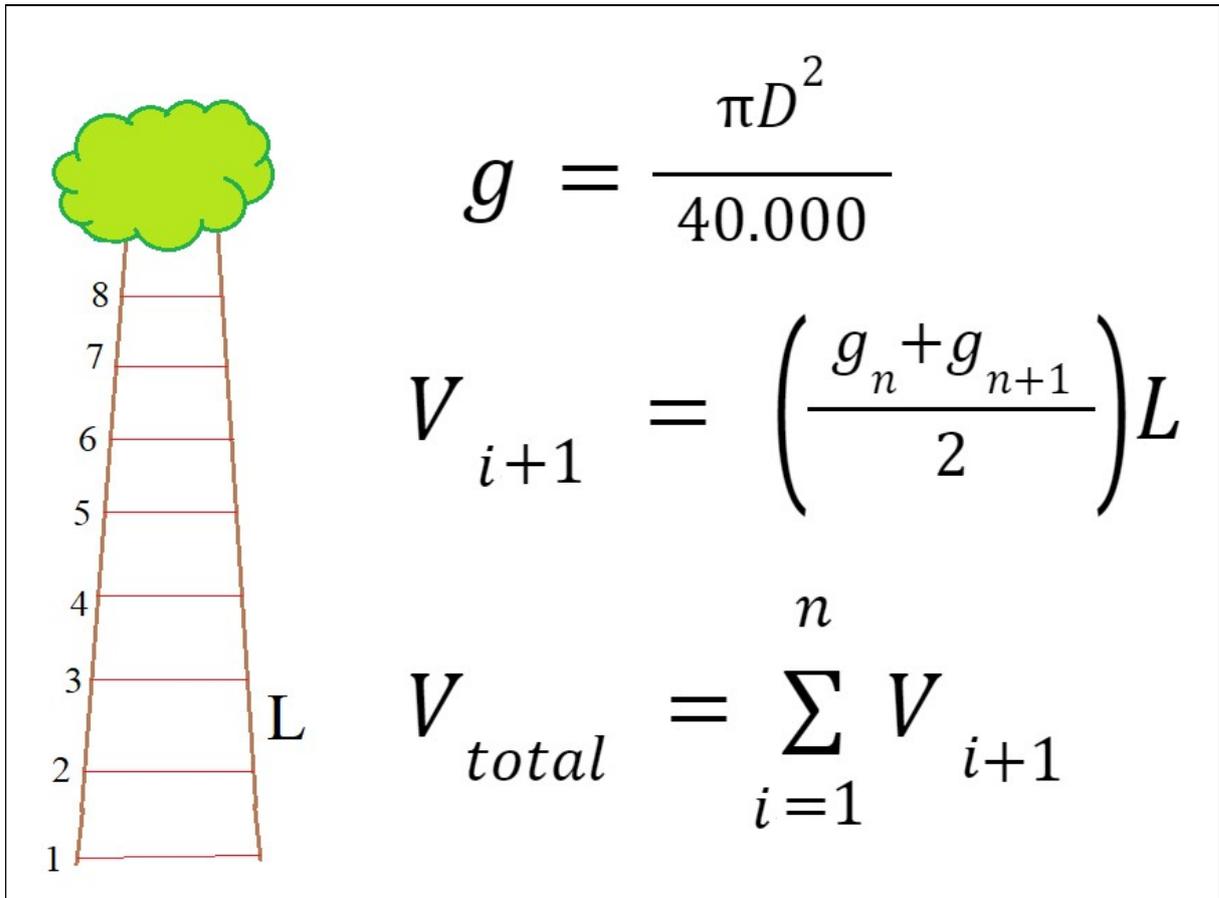
- Newton:

$$V = \frac{(g_1 + 4g_{1/2} + g_2)L}{6} \quad (3)$$

No caso em que "V" representa o volume comercial do fuste, que basicamente é o volume da madeira um diâmetro mínimo de utilização. É importante destacar que, embora as fórmulas aproximativas usem "L" ou "h" em suas equações, as diferenças resultantes são insignificantes. A equação de Smalian tende a superestimar o volume, enquanto a equação de Huber tende a subestimá-lo (CHATURVEDI, 1926 apud CAMPOS; LEITE, 2013) e (FLORIANO, 2021). Além disso, o uso de fórmulas aproximativas decorre da falta de conhecimento sobre a forma do tronco, ou seja, se ele é cilíndrico, parabolóide, neilóide ou outra forma conhecida. Quanto menor for o comprimento entre as seções "L", maior será a exatidão em qualquer uma das equações mencionadas anteriormente. De acordo com os estudos realizados por Floriano (2021), a fórmula de Smalian é a mais comumente empregada para previsão de volume no Brasil.

No entanto, vale ressaltar que se o tamanho da seção for menor ou igual a 10 centímetros, pode-se assumir que a árvore possui vários troncos de cone (cavacos) e, nesse caso, a fórmula do tronco de cone pode ser aplicada (CAMPOS; LEITE, 2013).. Embora o uso desse método proporcione uma estimativa robusta do volume da madeira, é um processo trabalhoso. Portanto, é aconselhável realizar a cubagem de seções entre 1 e 2 metros (Figura 2) e, em seguida, aplicar as fórmulas mencionadas anteriormente. Os três métodos citados são amplamente utilizados no setor florestal para previsão de volume de madeira e são bastante robustos (CAMPOS; LEITE, 2013).

Figura 2 - Figura ilustrativa do emprego do método de Smalian



Fonte: O Autor (2023).

Sendo:

V o Volume Comercial (Volume até a primeira ramificação) (m³);

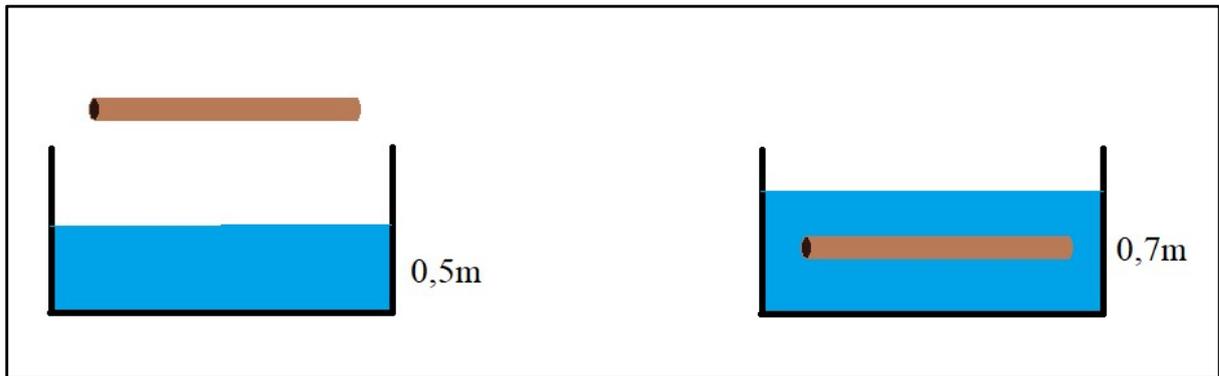
L o comprimento do fuste (tronco/caule) e geralmente é usando L = h (m);

g sendo a área circular do fuste (m²);

4.1.2 Xilometria

Segunda Lima et al. (2016) e Machado et al. (2006) a xilometria é um método que calcula o volume madeireiro através do deslocamento de água de forma bastante preciso, quando se insere uma tora madeireira em um tanque que contém água e que esteja nivelado, há um descolamento de água, e esse deslocamento pode ser medido, para calcular o volume (figura 3).

Figura 3 - Imagem ilustrativa de um xilometro.



Fonte: O Autor (2023).

$$V = \text{Comprimento} \times \text{Largura} \times \text{Altura}$$

$$V_1 = C_1 \times L_1 \times A_1 \quad (4)$$

$$V_2 = C_2 \times L_2 \times A_2$$

$$V_{\text{tora}} = V_2 - V_1$$

Com isso consegue-se calcular o volume madeireiro de forma precisa, porém, vale ressaltar que essa técnica é pouco empregada justamente pelo fato de ser bastante demorada e onerosa para grandes empresas. Geralmente utiliza-se esse método com toras de até 1 a 2 metros, e usualmente é utilizado para retirar amostras de alguma população florestal para a predição do volume. Além disso, fatores como pressão e temperatura influenciam diretamente na densidade da água e que pode afetar o volume, no entanto, em regiões com temperaturas estáveis, como o Brasil, esse processo pode ser aplicado (SILVA; PAULA NETO, 1979).

4.2 Uso de LiDAR para medições dendrométricas

Com os avanços do sensoriamento remoto, os medidores agora podem realizar medições de distância sem a necessidade de prismas/refletores, permitindo a determinação remota de coordenadas sem o contato direto com o objeto (WUTKE, 2006). Conforme Beirão (2011), os sensores estão se tornando cada vez mais modernos e capazes de realizar medições em menos tempo. Os pulsos eletromagnéticos são emitidos pelo sistema de Laser Scanner com o auxílio de um espelho de varredura, percorrendo os objetos a serem escaneados. Após o pulso de laser ser emitido, os objetos refletem parte da energia do pulso, que é então capturada pelo sistema de lentes. A distância entre o sensor e o objeto iluminado é

determinada com base no intervalo de tempo entre a emissão e a reflexão do pulso, permitindo o registro das coordenadas daquele ponto.

Segundo Dalmolin (2004), citado por Beirão (2011), os sistemas de varredura a laser são divididos em duas classes: dinâmica e estática. A classe dinâmica caracteriza a varredura em movimento e é geralmente utilizada em aeronaves, helicópteros, veículos terrestres em menor escala e até mesmo em plataformas espaciais remotamente pilotadas (ARP). Por outro lado, a classe estática é comumente utilizada em levantamentos terrestres em plataformas fixas (LIMA, 2008 apud BEIRÃO, 2011).

O Laser Scanner é utilizado para obter detalhes rápidos e precisos de objetos, eliminando a necessidade de medidas diretas e evitando a degradação do objeto causada pelo contato físico. Essa aplicação já foi utilizada na reconstrução de esqueletos arqueológicos, réplicas de estátuas, réplicas de patrimônios históricos e principalmente no levantamento e modelagem de interiores (BIM - Building Information Model), amplamente utilizado na área da arquitetura (ANAIS DO MUSEU PAULISTA, 2019).

De acordo com Lingnau et al. (2008), essa tecnologia é capaz de fornecer bons resultados na medição da altura em diferentes seções, desde que sejam planejadas de forma consistente. A situação ideal é um povoamento florestal menos denso, para evitar sombreamento durante a varredura. Além disso, conclui-se que a automação dendrométrica desse processo pode eliminar erros humanos e que essa aplicação permite a obtenção da forma, volume e afilamento da árvore sem a necessidade de abate, como é feito pelas técnicas clássicas/tradicionais. Além disso, esses dados podem ser usados para simulações de poda e desbaste.

Para obter melhores resultados nas variáveis, como o diâmetro, é necessário filtrar qualquer ruído ao longo do tronco na nuvem de pontos, a fim de evitar superestimações. Além disso, em partes do fuste onde não há galhos, o Laser Scanner pode determinar diâmetros em diferentes alturas (LINGNAU, 2009).

O estudo realizado por Martins Neto et al. (2013) revelou que a distância entre o laser scanner e o alvo tem um impacto direto na qualidade dos dados obtidos. Além disso, o estudo destacou que a altura da árvore também influencia a escolha da distância a ser utilizada durante a varredura, e essa escolha está diretamente relacionada à obtenção do diâmetro.

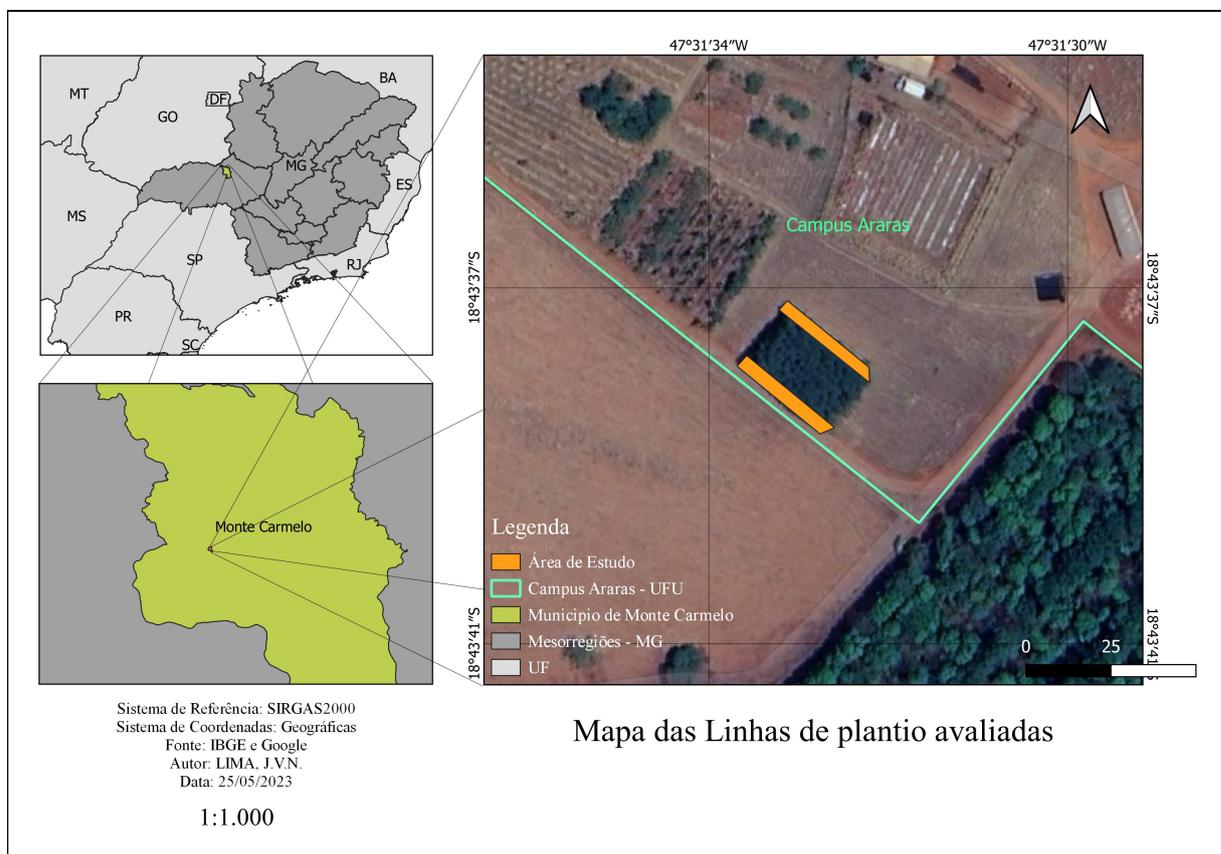
Os equipamentos que incorporam a tecnologia LiDAR realizam uma varredura tridimensional com um alto nível de precisão, quando comparados às metodologias e técnicas clássicas/tradicionais empregadas no setor florestal (ALMEIDA, 2017).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na Unidade Araras, do Campus Monte Carmelo, da Universidade Federal de Uberlândia, que está inserida no município de Monte Carmelo, na mesorregião do Alto Paranaíba do Estado de Minas Gerais (figura 4). A área de estudo conta com 224 árvores de um clone de *Eucalyptus sp.* Neste estudo foram utilizado somente as duas linhas laterais contendo um total de 50 árvores.

Figura 4 – Mapa de Localização da Área de Estudo de Eucaliptos.



Fonte: O Autor (2023).

5.2 Material

Para este trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Estação Total Robótica MS50 (figura 5);
 - Prismas Circulares AVR com offset de 0 mm a 30 mm (figura 6);
 - Bastão centimetrado (figura 6);
 - Tripé de apoio para bastão (figura 6);

- Par de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Hiper V RTK (figura 7);
 - Bastão de apoio para o receptor móvel;
 - Base nivelante para encaixe de 1 receptor (base);
- Trena de 50 metros;
- Fita milimetrada de 3 metros;
- Cardeneta de Campo.

Figura 5 - Foto da Estação Total Robótica (ETR) MS50.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 6- Foto do conjunto, Tripé, Bastão centimetrado e Prisma.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 7 - Foto da maleta com o par de receptores GNSS, base nivelante e coletora.



Fonte: O Autor (2023).

5.2.1 ETR MS-50

Para o estudo, foi utilizada a Estação Total Robótica (ETR) MS50 (Figura 5) para o escaneamento tridimensional dos troncos de árvores. Essa estação foi desenvolvida pela Leica Geosystems e possui diversas aplicações, incluindo o escaneamento tridimensional, medições de posição direta e inversa, locação, conectividade com receptores GNSS, reconhecimento automático de prismas e compensadores de erros.

A ETR MS50 possui recursos que permitem corrigir diferentes tipos de erros, como o erro de índice vertical, erro de colimação, erro de índice do compensador e inclinação do eixo secundário. Além disso, ela oferece correções para projeção cartográfica, efeitos atmosféricos, umidade, temperatura e curvatura terrestre (LEICA GEOSYSTEMS® apud VIEIRA, 2018).

As especificações da ETR MS50 incluem:

- Precisão angular de 1" (Calibrada)
- Precisão Linear de 1 mm + 1,5 ppm (com prisma)
- Precisão Linear de 2 mm + 2 ppm (sem prisma)
- Distância com prisma: 1,5 m até 10 km
- Distância sem prisma: 1,5 m até 2 km

5.2.2 Receptor GNSS

O receptor GNSS Hiper V RTK da Topcon Tools foi usado para coletar coordenadas de apoio no terreno. Esse receptor possui rastreamento de 226 canais das constelações GPS e GLONASS de dupla frequência(L1/L2 e também L2C) (TOPCON, 2016). A seguir têm-se as precisões do equipamento:

- Usando somente L1 - H: 3 mm + 0,8 ppm V: 4 mm + 1 ppm;
- Usando L1 e L2 (modo estático) - H: 3 mm 0,1 ppm V: 3,5 mm + 0,4 ppm
- Usando L1 e L2 (Modo Cinemático em Tempo Real) - H: 10 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm
- GPS Diferencial < 0,5 m

5.2.3 Processamento dos dados

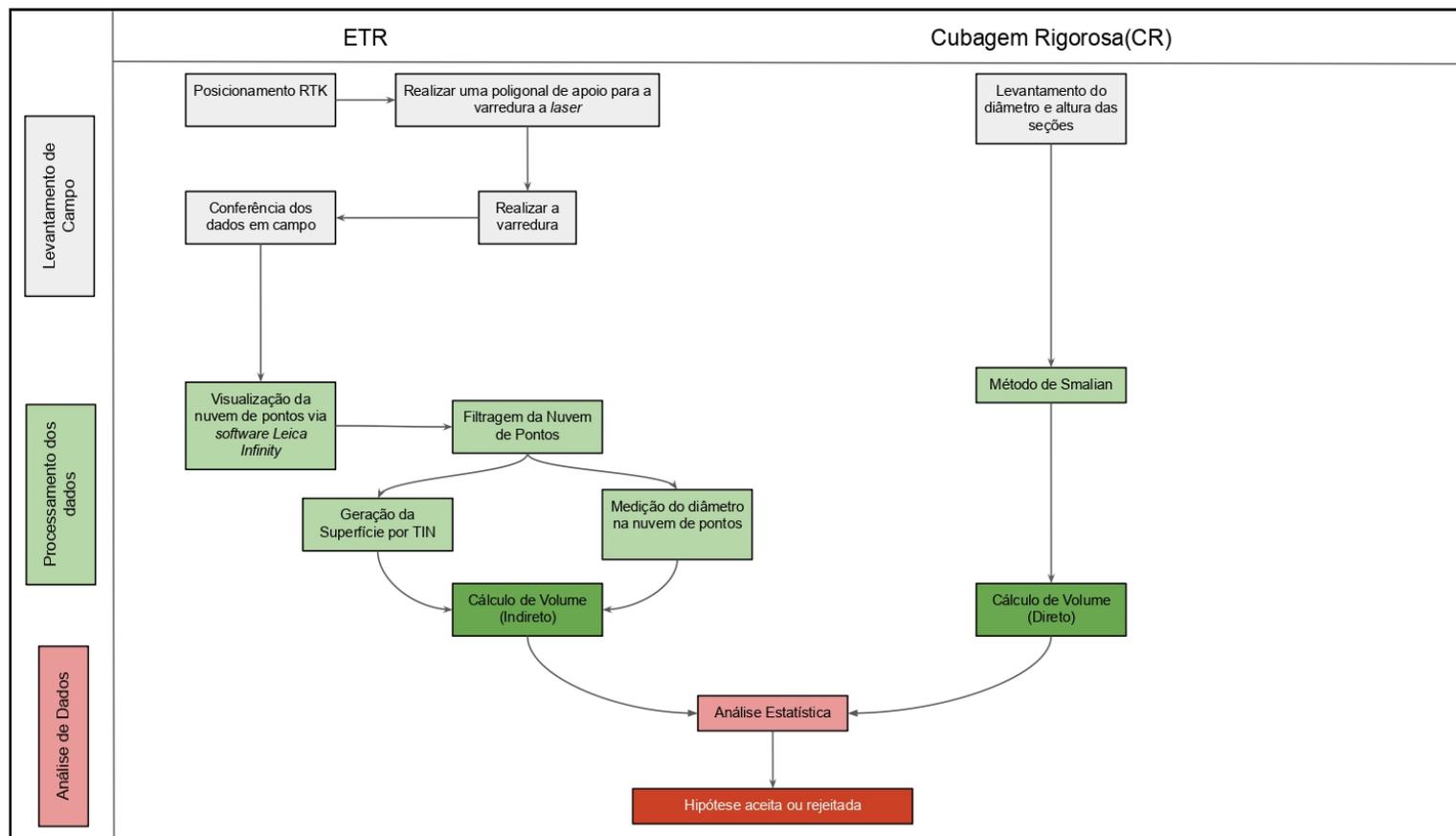
Foram utilizados os seguintes *software* para os processamentos, filtragens das nuvens de pontos, geração da superfície e cálculo de volume:

- *Software SmartWorx Viva* para armazenamento dos dados levantados com a ETR MS50;
- *Software Leica Infinity* para a visualização e mensuração da nuvem de pontos;
- *Software Magnet Field* para armazenamento e cálculo das coordenadas em tempo real(RTK);
- Planilha eletrônica para os cálculos de volume madeireiro por cubagem rigorosa (CR).

5.3 Métodos

A metodologia foi seguida conforme o fluxograma apresentado a seguir (figura 8).

Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos de campo e escritório



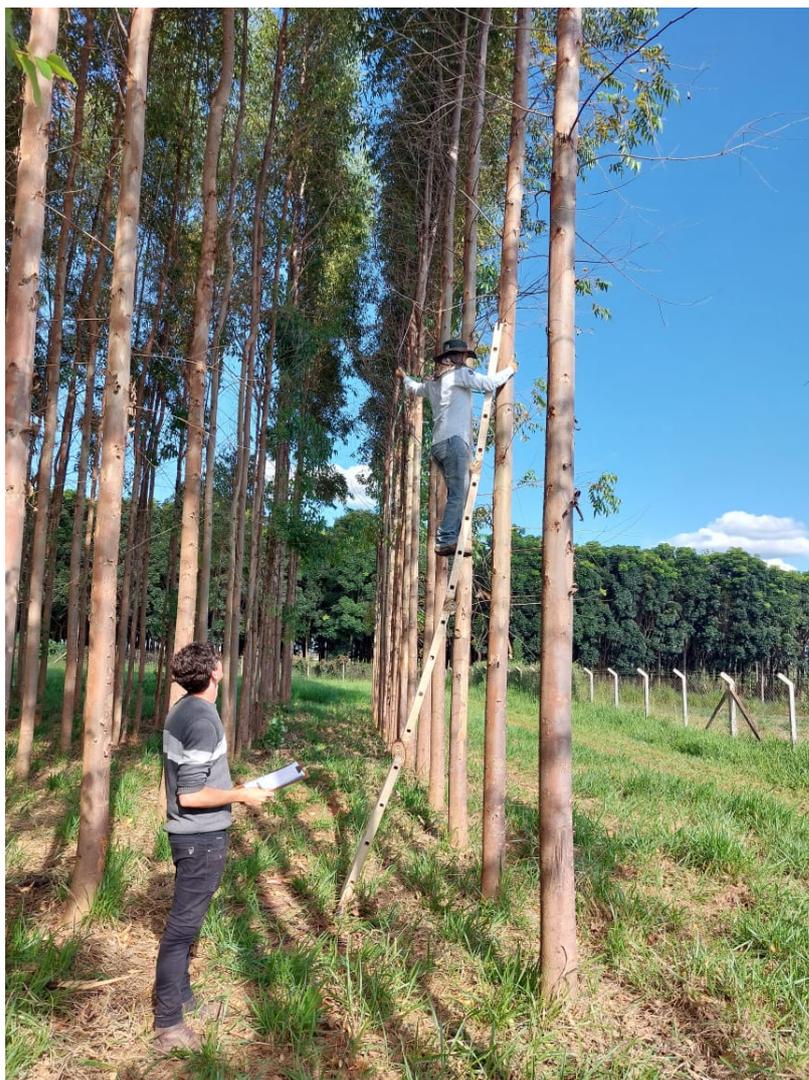
Fonte: O Autor (2023).

5.4 Levantamento de Campo

5.4.1 Cubagem Rigorosa

Para a quantificação direta do volume de madeira, foi realizada a cubagem rigorosa das árvores com o auxílio de uma escada de 4 metros. Foi gasto um total de 9 horas para a realização das mensurações por duas pessoas. No primeiro momento foram feitas marcações nas 50 árvores das linhas mais externas do plantio (Figura 4) utilizando um giz branco e uma trena nas seguintes alturas: 0,5 m; 1,0 m; 1,3 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,5 m; 3,0 m; 3,5 m; 4,0 m; 4,5 m e 5,0 m. Posteriormente com o auxílio de uma fita milimetrada foram medidas as circunferência a estas alturas. A cubagem rigorosa foi realizada até a altura de 5,0 m por impossibilidade operacional de medições acima desta altura com as árvores em pé

Figura 9 – Foto da mensuração da cubagem rigorosa



Fonte: Autor (2023).

As mensurações anotadas foram inseridas em planilha eletrônica e foram feitos os cálculos de transformações de circunferência para diâmetro e posteriormente o de volume das seções utilizando a fórmula de Smalian (2). Em seguida, foram somados os volumes das seções para a obtenção do volume madeireiro até 5 metros de altura para a comparação entre os métodos de cubagem rigorosa e ETR.

5.4.2 Posicionamento RTK

Foi utilizado um par de receptor GNSS Hiper V RTK (*Real Time Kinematic*) para obter em tempo real coordenadas de apoio para o levantamento topográfico, a qual um dos receptores foi posicionado em um marco passivo da rede geodésica do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), com a id de 99657 (figura 10), e o outro receptor foi considerado como o receptor móvel a qual foi utilizado para fazer o posicionamento cinemático em tempo real. Cabe ressaltar que foram instalados somente dois pontos de apoio para poligonal topográfica por meio do GNSS Hiper V RTK e os pontos de apoio restantes foram irradiados pela ETR MS50.

Figura 10 - Foto do marco passivo da rede Geodésica do IBGE.



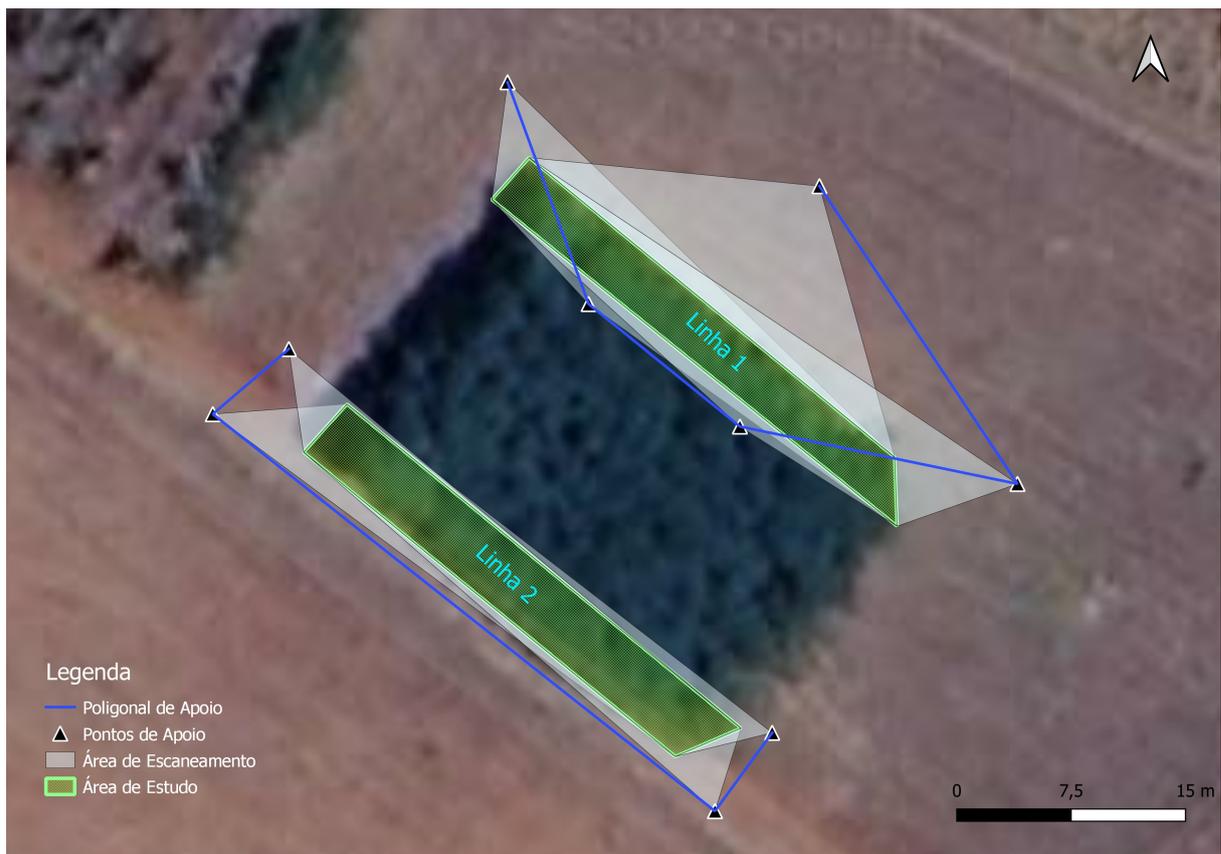
Fonte: IBGE (2023).

5.4.3 Levantamento Topográfico

O levantamento topográfico foi realizado utilizando a ETR MS50 para obter as coordenadas de apoio para o escaneamento tridimensional dos fustes de *Eucalyptus*. Foi estabelecida uma poligonal aberta, na qual as distâncias foram calculadas com base em uma média de cinco observações feitas pela ETR em cada ponto de apoio. Esses pontos de apoio foram estrategicamente posicionados para garantir que o escaneamento abrangesse toda a estrutura vegetal, conforme ilustrado na Figura 11.

É importante ressaltar que apenas as linhas de bordas foram escaneadas, devido à limitação da ETR. A distância entre linhas e entre as árvores não favoreceu o escaneamento, uma vez que a ETR possui uma restrição, na qual ela não é capaz de obter coordenadas tridimensionais para distâncias menores que 1,5 m a partir do sensor.

Figura 11 - Imagem com o planejamento de campo.



Fonte: O Autor (2023).

Foram realizados escaneamentos tridimensionais em cada ponto de apoio, com uma área definida do escaneamento em direção às árvores (figura 11), com um espaçamento entre

pontos da nuvem de pontos de 1 cm na horizontal, e 3 centímetros na vertical. Cabe salientar que na linha 2 foram feitos somente 4 pontos de apoio, devido ao fato de que o espaçamento entre as árvores da linha 2 é diferente do espaçamento da linha 1 e durante o procedimento foi constatado que seria possível realizar o escaneamento tendo o recobrimento de toda a árvore

Todo o escaneamento levou cerca de nove horas para ser realizado, com média durou 1 hora por ponto de apoio, e somente foi necessária uma pessoa para realizar os procedimentos de campo.

As figuras 12 e 13 mostram as fotos do prisma em campo e da ETR realizando o escaneamento tridimensional

Figura 12 - Imagem do prisma em campo.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 13 - Imagem da ETR em campo



Fonte: O Autor (2023).

5.5 Processamento dos dados

Para o posicionamento RTK, por ter comunicação via rádio entre os receptores GNSS, as coordenadas são obtidas em tempo real, por isso não houve nenhum processamento.

5.5.1 Processamento da Cubagem Rigorosa

Após as medições feitas em campo, todos os dados de circunferência foram digitados em uma planilha eletrônica. As circunferências foram convertidas em diâmetro através da equação (5), e para cada ponto de medição foi calculada a área seccional. Posteriormente foi calculado volume de cada seção. Onde o Diâmetro foi utilizado à seguinte equação:

$$d_i = \frac{c_i}{\pi} \quad (5)$$

$$g_i = \frac{\pi d_i^2}{40000} \quad (6)$$

Sendo:

d_i – Diâmetro à altura i ao longo do tronco, em centímetros

c_i – circunferência à altura i ao longo do tronco, em centímetros

g_i – área seccionada à altura i ao longo do tronco, em metros

Posteriormente, com as áreas de seções definidas, foi utilizada a fórmula de Smalian (2) para calcular o volume das seções e posteriormente a soma desses volume para se obter o volume de madeira do tronco até 5 metros de altura para cada árvore.

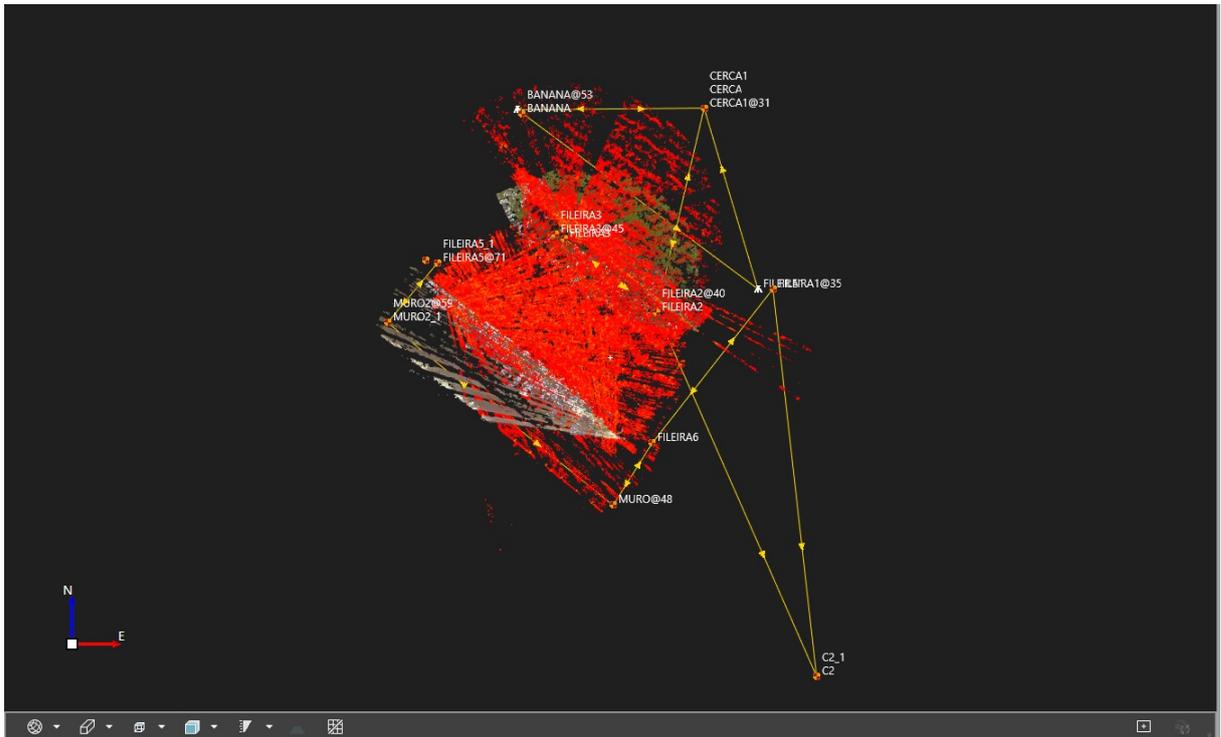
5.5.2 Processamento da ETR

Foram adotadas duas técnicas para o cálculo do volume madeireiro. Sendo a primeira utilizando uma superfície TIN em torno na árvore, e a segunda, utilizando medição de distância entre pontos do fuste na nuvem de pontos bruta.

5.5.2.1 Criação de Superfície TIN

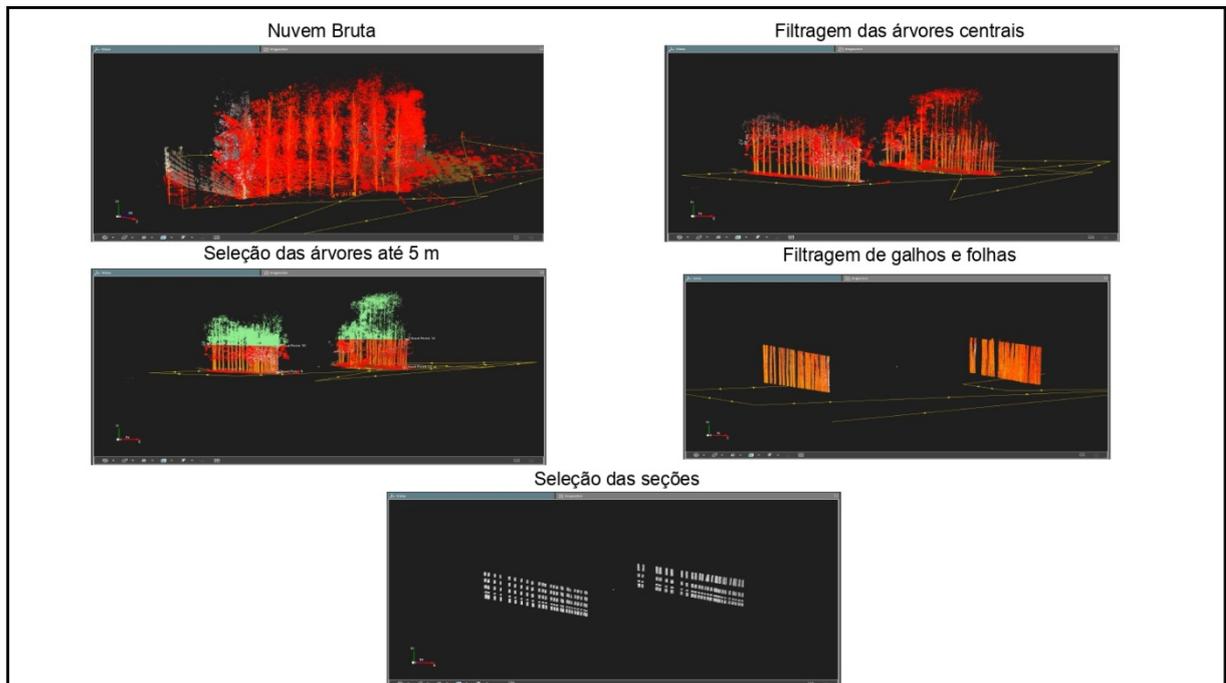
As nuvens de pontos e todos os pontos de apoio foram descarregados no *Software Leica Infinity*, e posteriormente foi avaliada de forma visual a qualidade das nuvens de pontos (Figura 14).

Figura 14 - Imagem do *Software Leica Infinity* após o descarregamento da nuvem.



Fonte: O Autor (2023).

Os processos de filtragens das nuvens de pontos foram realizados por meio do *Software Leica Infinity*, através de seleção e exclusão manual de todos os pontos que representam os galhos e as copas das árvores, e dessa maneira, o fuste ficou bem representado e com menos ruídos para a geração da superfície.

Figura 15 – Filtragem pelo *Software Leica Infinity*:

Fonte: O Autor (2023).

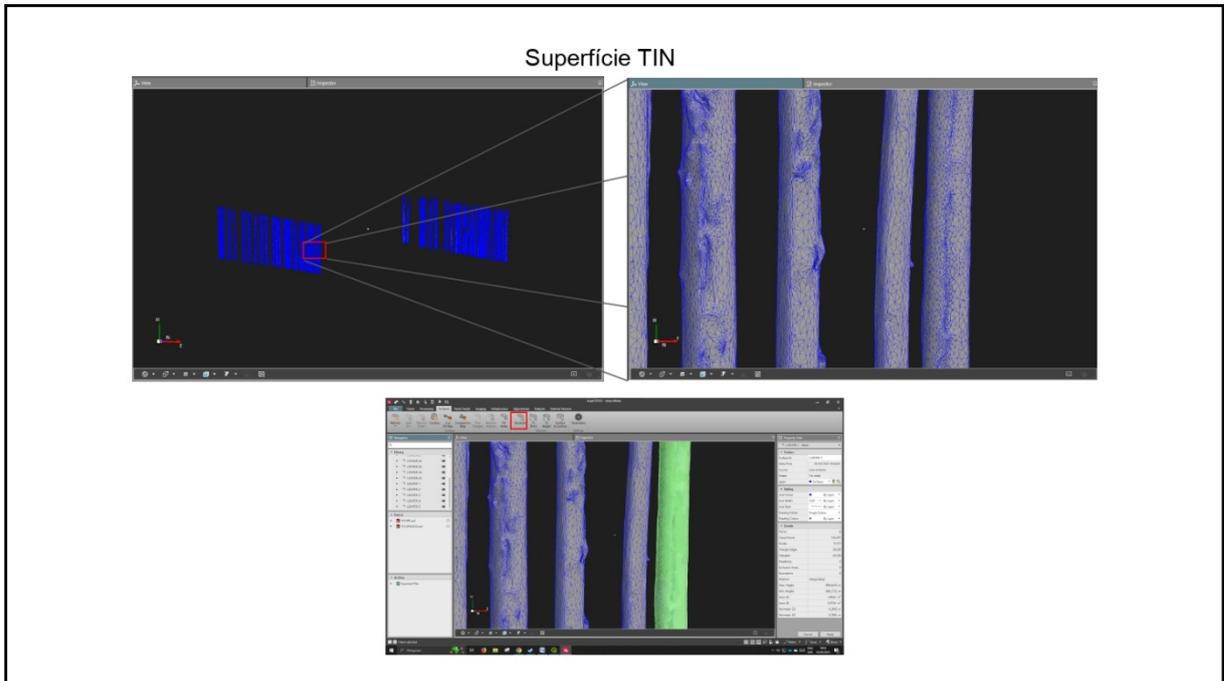
Posteriormente, foi feita uma seleção com todos os pontos que representam o fuste para a geração de uma superfície através de uma rede irregular triangular (TIN - *Triangulated Irregular Network*).

Após a geração da superfície TIN, os cálculos dos volumes madeiros foram realizados utilizando uma função chamada "Stockpile" do software Leica Infinity. Essa função é capaz de calcular o volume de pilhas de qualquer tipo, desde que a superfície esteja modelada de maneira regular e precisa pelas nuvens de pontos obtidas.

Cada árvore teve seu volume madeiro calculado individualmente usando essa técnica. Em seguida, foram realizadas análises estatísticas para avaliar a acurácia, precisão e correlação dos volumes obtidos em comparação com os volumes medidos por meio da cubagem rigorosa, que é uma técnica clássica amplamente utilizada.

Essas análises estatísticas são importantes para verificar a confiabilidade dos resultados obtidos pelo método de escaneamento tridimensional em comparação com o método tradicional de cubagem rigorosa, permitindo avaliar a precisão e a exatidão do método proposto.

Figura 16 – Geração da superfície TIN e cálculo de volume

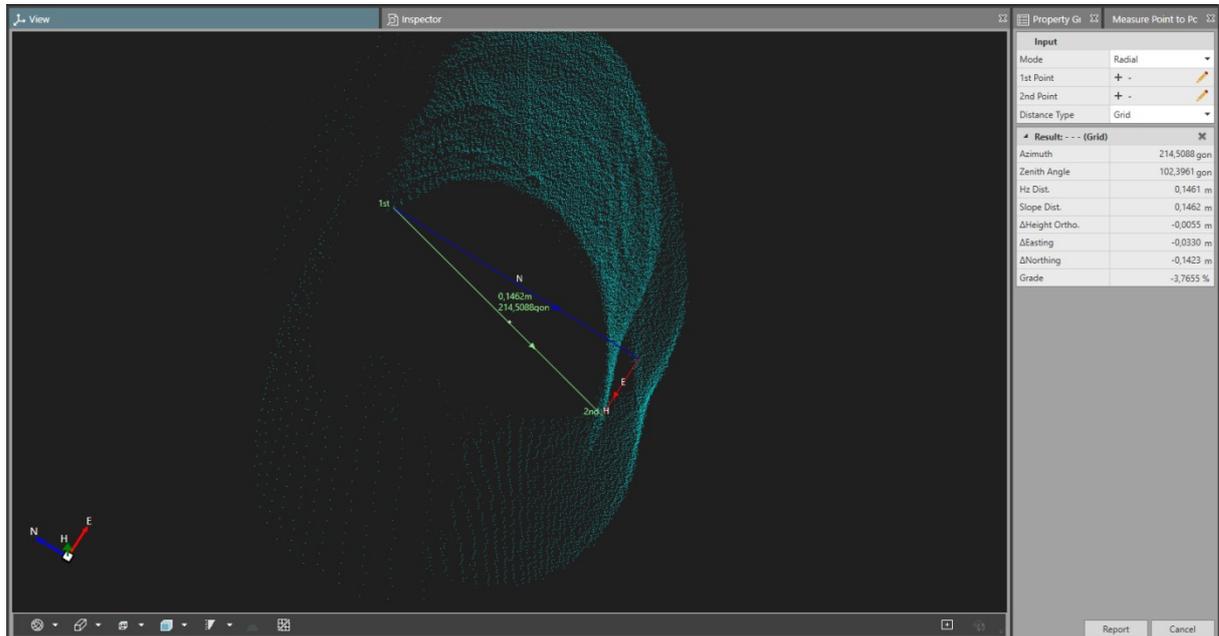


Fonte: O Autor (2023).

5.5.2.2 Mensuração dos diâmetros na nuvem de pontos

Foram realizadas também medições de diâmetros ao longo do fuste na nuvem de pontos utilizando a ferramenta *Measure Point to Point* do *Software Leica Infinity*, nas seguintes alturas: 0,5 m; 1,0 m; 1,3 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,5 m; 3,0 m; 3,5 m; 4,0 m; 4,5 m e 5,0 m. Com os diâmetros medidos, foi realizado o cálculo de volume das seções pela fórmula de Smalian e posteriormente as análises estatísticas em comparação com os diâmetros e volumes medidos por cubagem rigorosa.

Figura 17 – Medição de Diâmetro da seção 0,5 m - 1,0 m da árvore 1, Linha 2



Fonte: O Autor (2023).

5.6 Análise dos Dados

5.6.1 Análise Estatística Descritiva

Foi feita uma análise estatística descritiva de todos os volumes e diâmetros medidos em campo e utilizando a nuvem de pontos. Dentre as análises está o histograma dos volumes e diâmetros medidos em campo e também utilizando a nuvem de pontos, e por fim o gráfico de probabilidade dos volumes e diâmetros utilizando teste de probabilidade Anderson-Darling. Todas essas análises foram feitas via *Software Minitab*

Também foi feito o teste de hipótese ANOVA, para verificar se a linha 1 e linha 2 possuem diferenças estatística.

5.6.2 Análise Estatística de RMSE, RMSE%, Desvio Padrão e Correlação

A verificação e as análises dos volumes madeireiros de cada seção foram feitos por meio de cálculos estatísticos de desvio padrão, raiz quadrada do erro médio quadrático, Raiz quadrada do erro médio quadrático em porcentagem e correlação de Pearson entre volumes madeireiro resultantes dos métodos de ETR e Cubagem Rigorosa. A Cubagem Rigorosa por ser uma técnica clássica e que em trabalhos anteriores a este já provaram sua eficácia em relação ao método da Xilometria, essa portanto foi tomada como o volume madeireiro real.

Foram realizadas análises dos resultados do RMSE% de cada seção, considerando tanto a técnica da superfície TIN quanto o volume obtido a partir da nuvem de pontos bruta.

Também foi feito um ajuste dos resultados de volume, utilizando uma compensação do erro médio, a qual foi verificada que as medidas possuíam erros sistemáticos. Esse erro médio foi feito através da subtração do volume real e volume da robótica, sendo realizada uma média desse erro, e posteriormente foi retirado esse valor das medidas de volume da robótica. Essa compensação se fez necessário para minimizar esse erro. E através dos volumes corrigidos dos instrumentos de ETR foram feitas as análises estatísticas:

- Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE - *root mean squared error*);

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{predi} t_i - V_{real_i})^2}{n}} \quad (7)$$

- Raiz quadrada do erro médio quadrático em porcentagem;

$$RMSE \% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{predi} t_i - V_{real_i})^2}{n}}}{\sum_{i=1}^n V_{real}} * n * 100 \quad (83)$$

- Desvio Padrão;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n}} \quad (9)$$

- Correlação de Pearson.

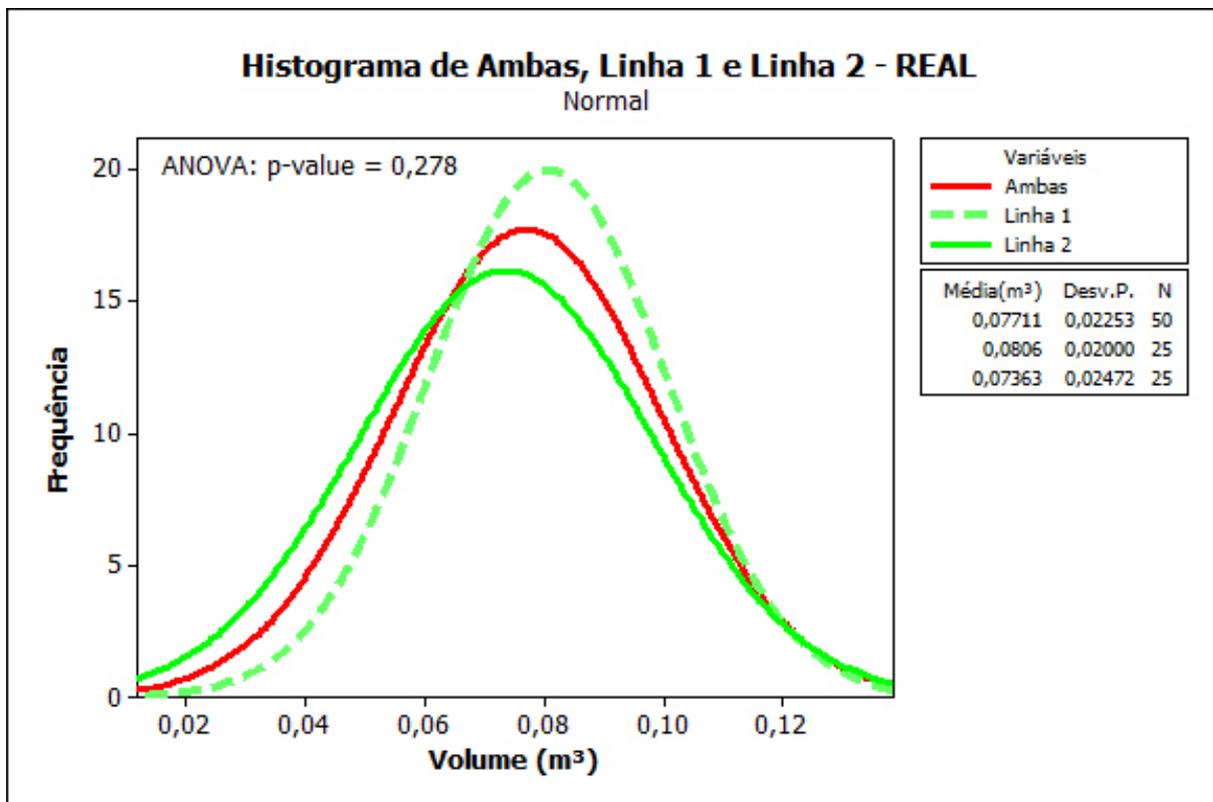
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{predi} t_i - \bar{V}_{predi} t) (V_{real_i} - \bar{V}_{real})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (V_{predi} t_i - \bar{V}_{predi} t)^2) (\sum_{i=1}^n (V_{real_i} - \bar{V}_{real})^2)}} \quad (10)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise descritiva dos dados de Volume

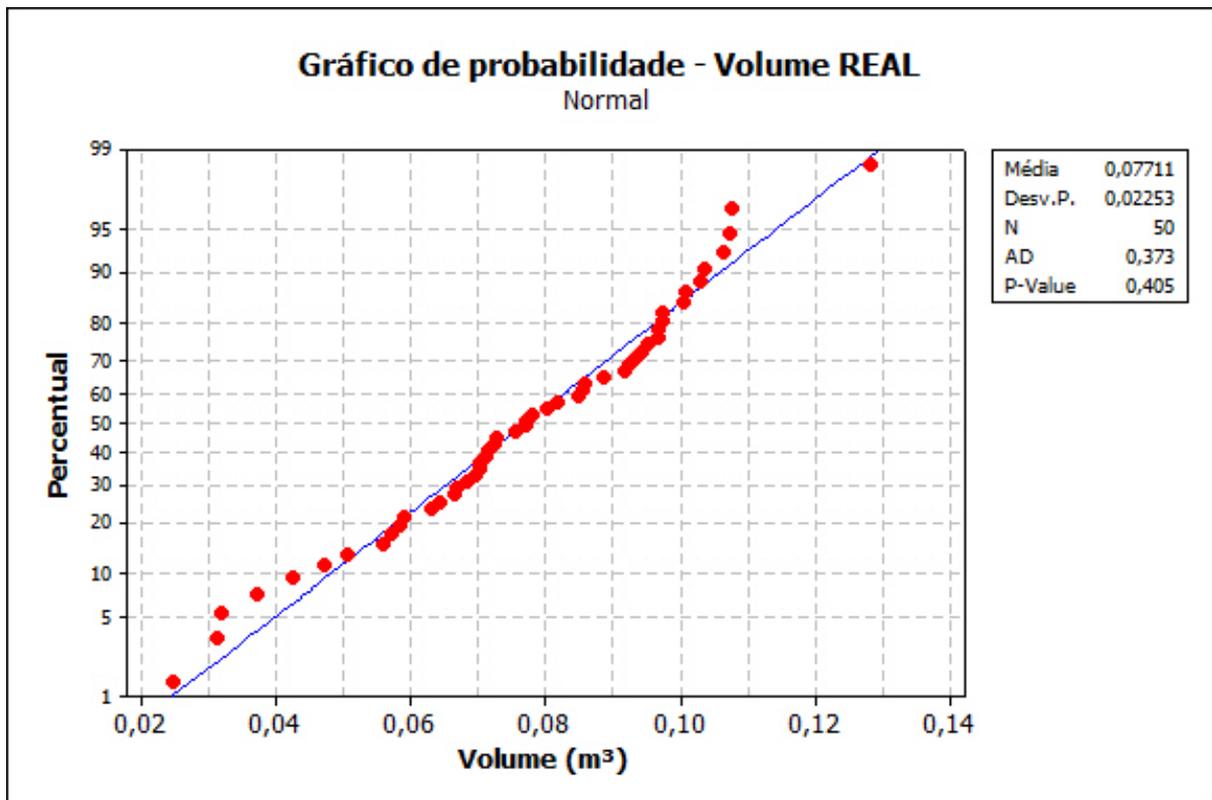
A Figura 18 mostra o histograma, bem como a média (m^3), Desvio Padrão e N de Ambas as Linhas, Linha 1 e Linha 2 do Volume Real. Já na Figura 19, mostra o gráfico de probabilidade do Volume Real bem como o P-Value de probabilidade de Anderson-Darling, média, Desvio padrão.

Figura 18 – Histograma de Ambas as Linhas, Linha 1 e Linha 2 do Volume Real



Fonte: O Autor (2023).

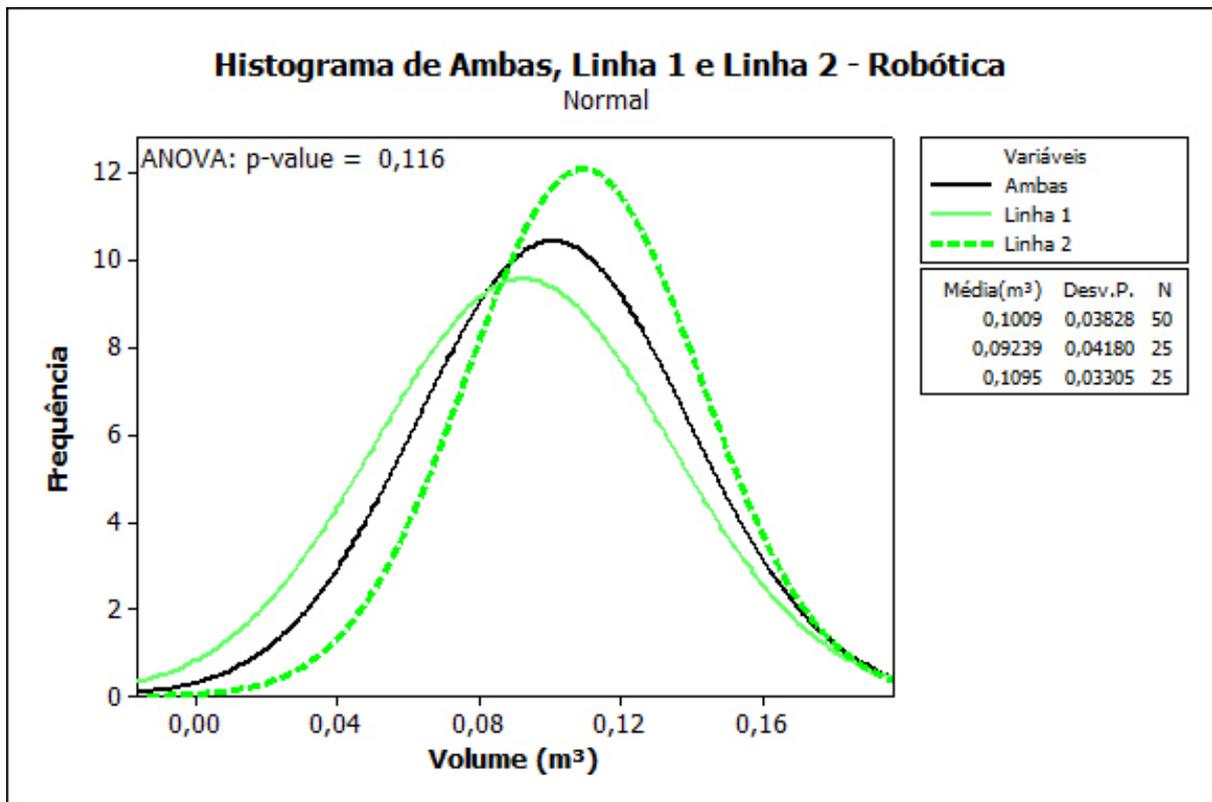
Figura 19 – Gráfico de Probabilidade Normal do Volume Real



Fonte: O Autor (2023).

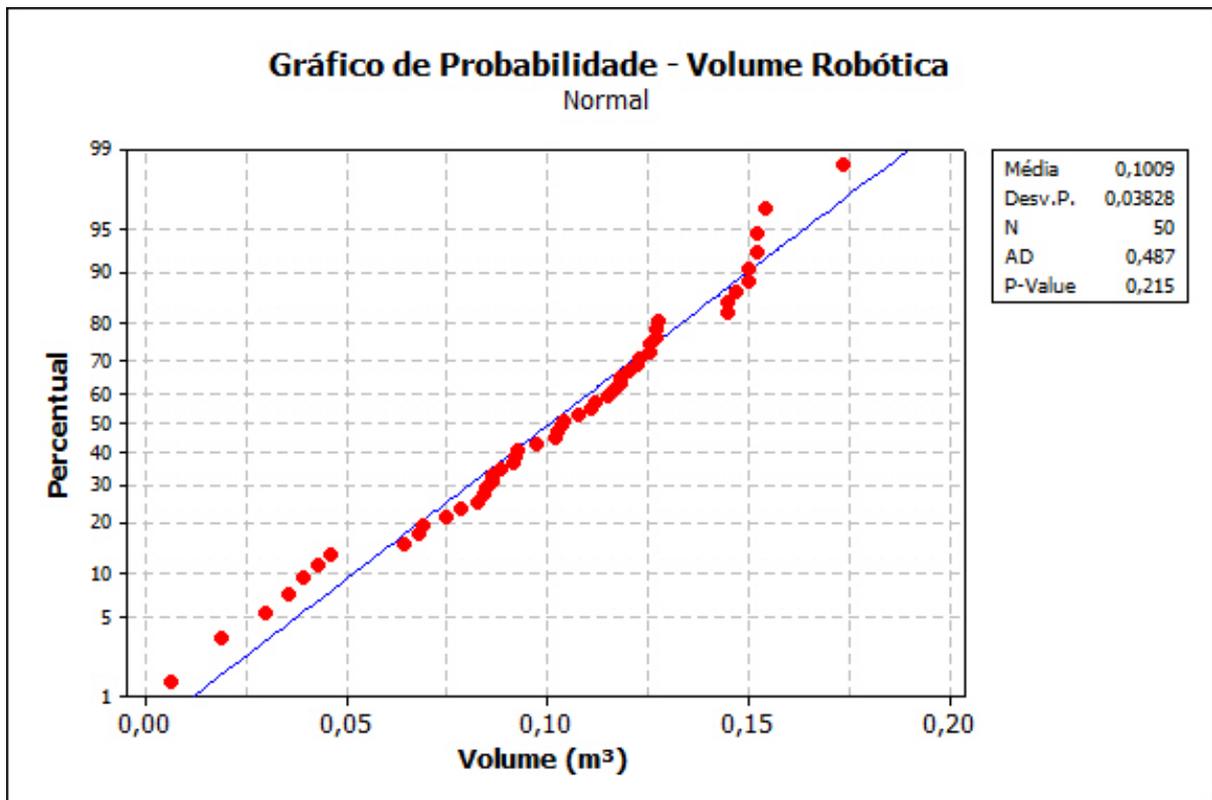
A Figura 20 mostra o histograma, bem como a média, Desvio Padrão e N de Ambas as Linhas, Linha 1 e Linha 2 do Volume Real. Já na Figura 21, mostra o gráfico de probabilidade do Volume Real bem como o P-Value, média, Desvio padrão.

Figura 20 – Histograma de Ambas as Linha, Linha 1 e Linha 2 do Volume Robótica



Fonte: O Autor (2023).

Figura 21 – Gráfico de Probabilidade Normal do Volume Robótica



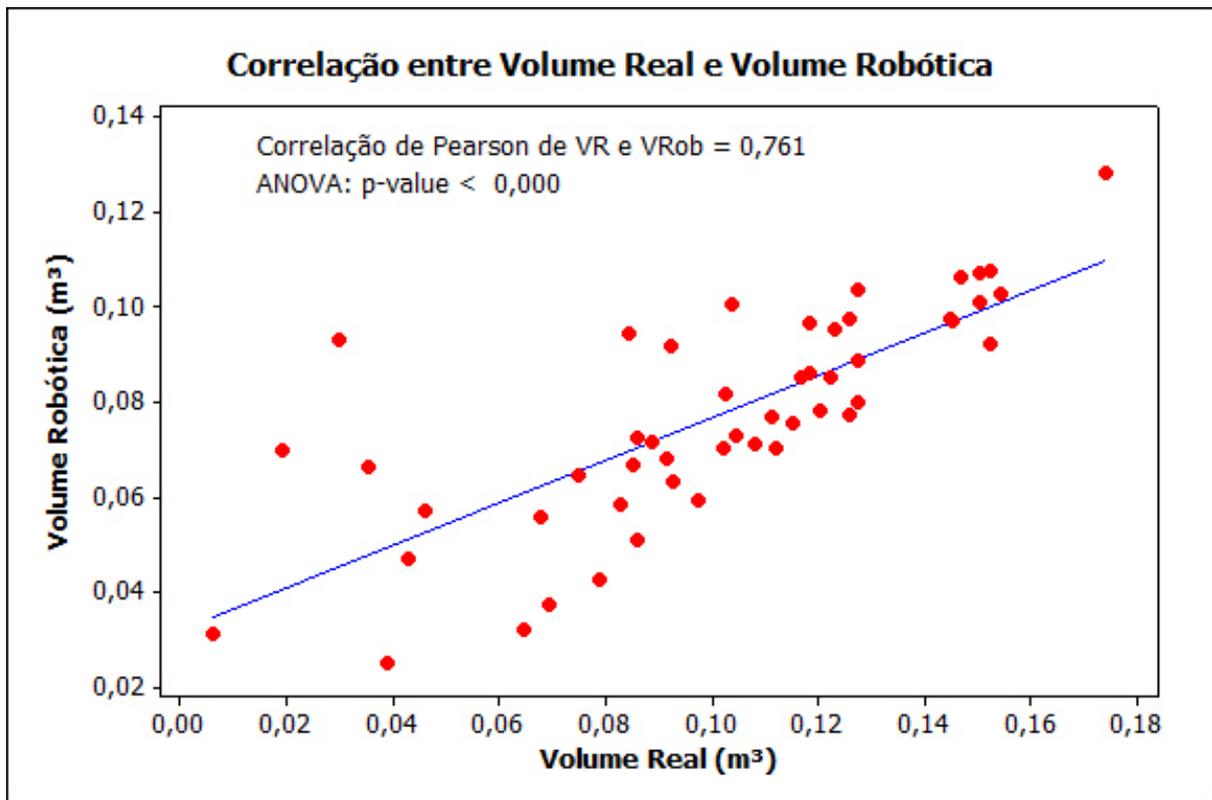
Fonte: O Autor (2023).

As Figuras 18, 19, 20 e 21 apresentam os resultados das análises iniciais dos dados de volume real (medidos por cubagem rigorosa) e volume obtido por meio da técnica de superfície TIN (Triangulated Irregular Network). Foi observado que a Linha 1 apresenta médias diferentes da Linha 2. Além disso, verificou-se que ambos os métodos apresentam distribuição normal dos dados, confirmada pelo teste de normalidade de Anderson-Darling.

Nas Figuras 18 e 20, é mostrado o resultado do teste de ANOVA realizado entre a Linha 1 e a Linha 2. Observou-se que o valor de p (p-value) nas Figuras 18 e 20 é maior que o nível de significância de 95%, indicando que existe diferença estatisticamente significativa entre a Linha 1 e a Linha 2.

A Figura 22 mostra a correlação entre o Volume Real e o Volume derivado da superfície TIN (Robótica).

Figura 22 – Gráfico de Correlação entre Volume Real e Volume Robótica



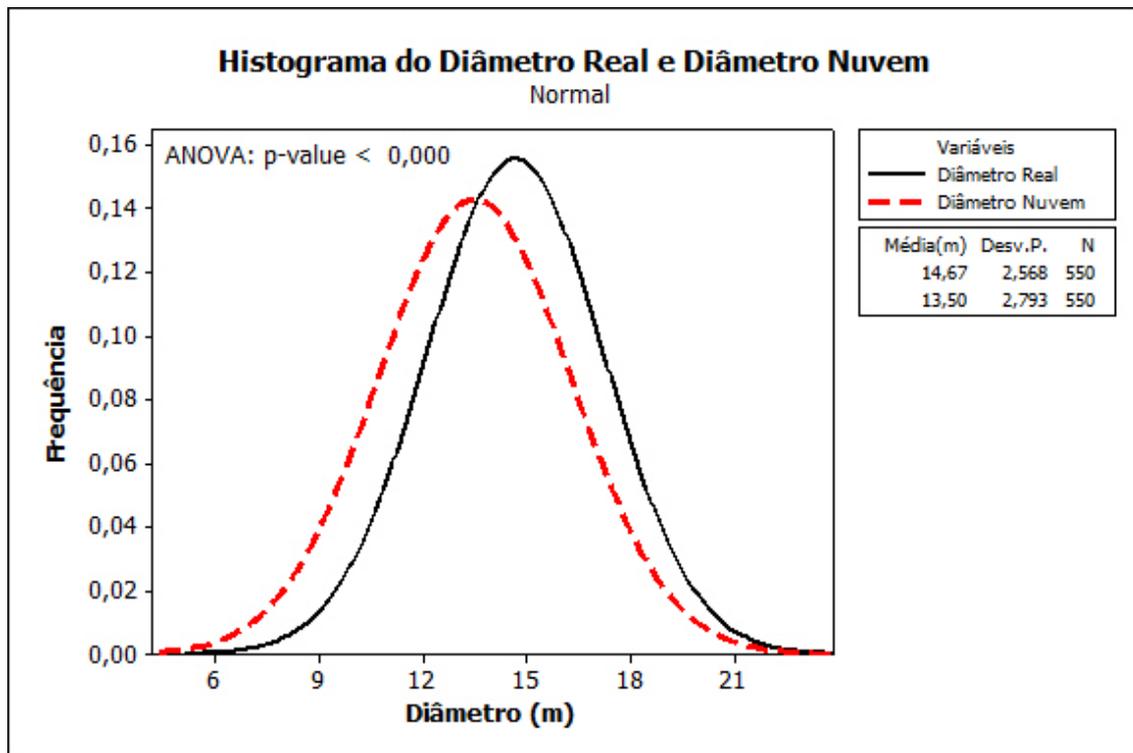
Fonte: O Autor (2023).

O cálculo de correlação de Pearson foi constatado que há correlação entre os volumes, sendo este 0,761 e que o teste ANOVA apresentou um valor de p (p-value) menor que 0,05, ou seja, com um nível de confiança de 95% o volume da robótica é estatisticamente igual ao volume real.

6.2 Análise descritiva dos dados de Diâmetro

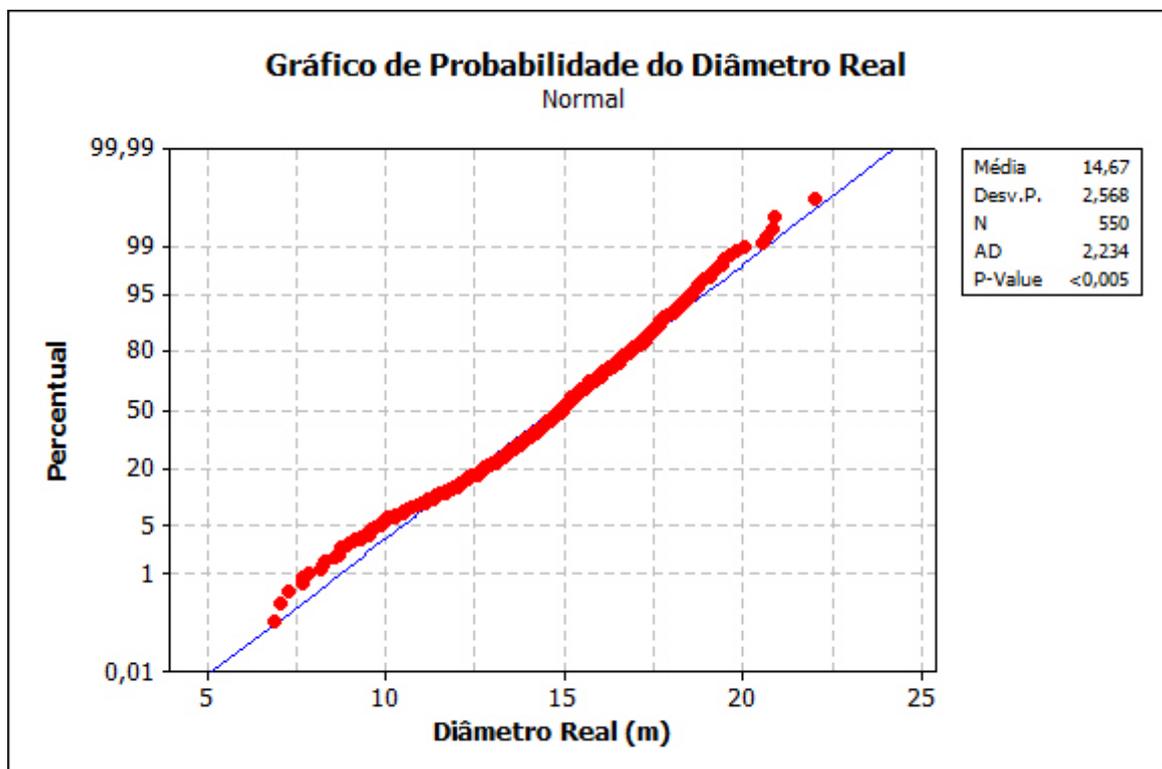
A Figura 23 mostra o histograma, bem como a média, Desvio Padrão e N do Diâmetro Real e Diâmetro da Nuvem. Já na Figura 24, mostra o gráfico de probabilidade do Diâmetro Real bem como o P-Value, média, Desvio padrão. Na Figura 25 mostra o gráfico de probabilidade do Diâmetro da Nuvem bem como o P-Value, média, Desvio padrão.

Figura 23 – Histograma do Diâmetro Real e Diâmetro da Nuvem



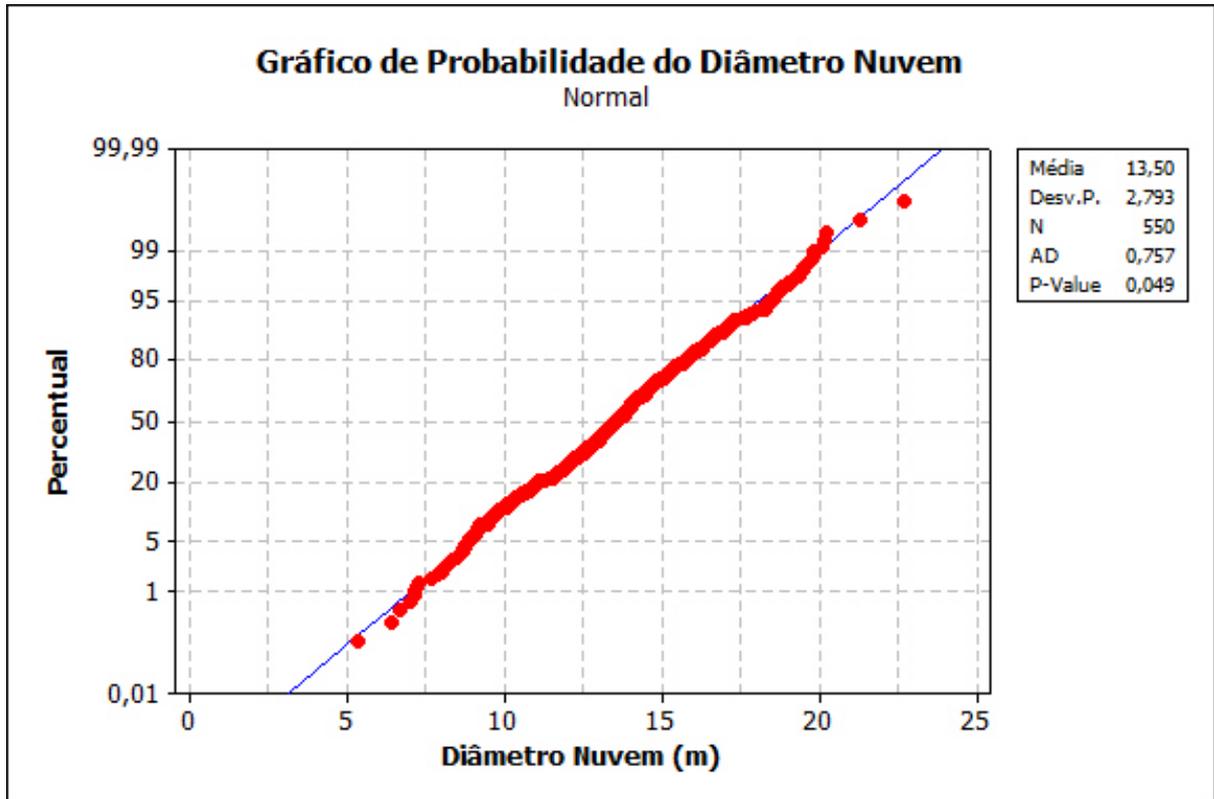
Fonte: O Autor (2023).

Figura 24 – Gráfico de Probabilidade Normal do Diâmetro Real



Fonte: O Autor (2023).

Figura 25 – Gráfico de Probabilidade Normal do Diâmetro da Nuvem



Fonte: O Autor (2023).

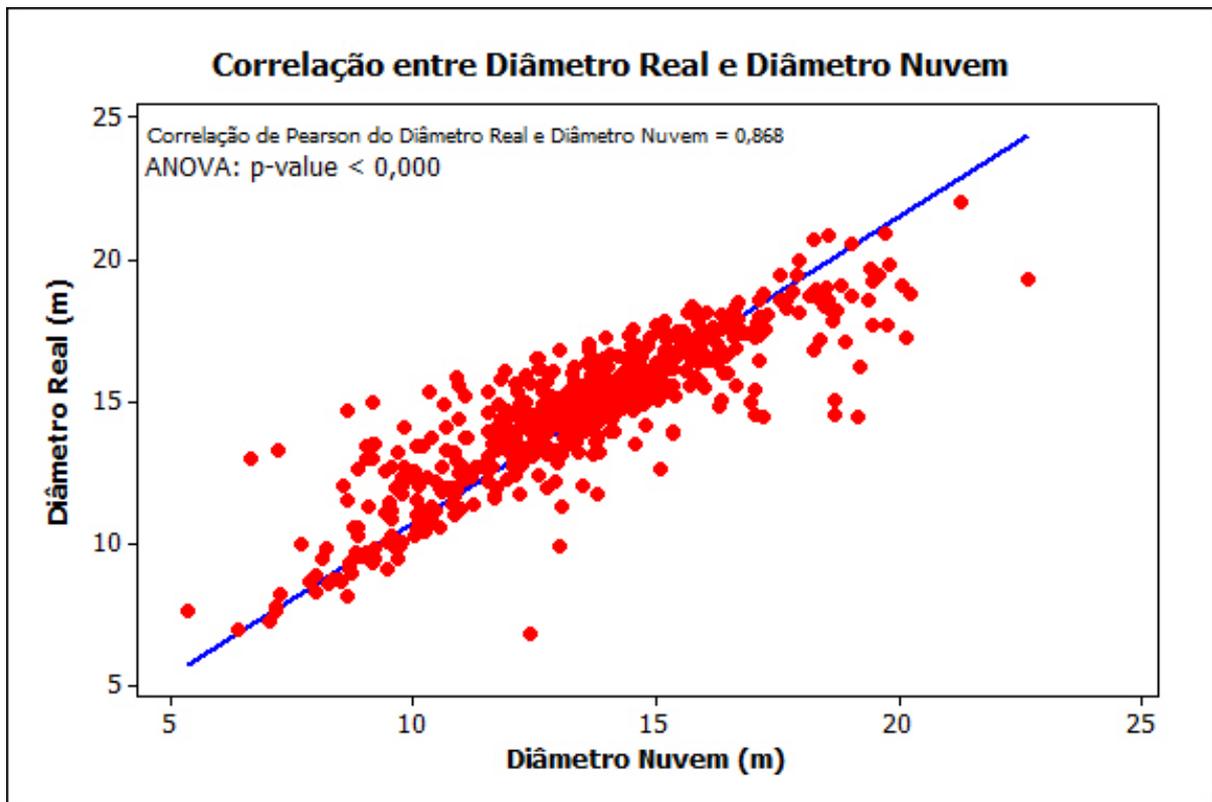
Conforme apresentado nas figuras 23, 24 e 25 são possíveis observar que a diferença entre o diâmetro real e diâmetro da nuvem não são significantes a um nível de confiança de 95%. Conforme a Figura 23 o valor de p (p-value) foi menor que 0,05 mostrando que são estatisticamente iguais.

Na Figura 24, o valor de p (p-value) é menor que 0,05, mostrando que os dados não seguem uma distribuição normal, porém isso se deve ao fato de que o número de amostras é alto contribuindo para a sensibilidade do teste de normalidade.

Na Figura 25 o valor de p (p-value) também é menor que 0,05, mostrando que os dados do diâmetro medidos na nuvem de pontos não seguem uma distribuição normal.

A Figura 26 mostra a correlação entre o Diâmetro Real e o Diâmetro derivado da nuvem bruta.

Figura 26 – Gráfico de Correlação entre Diâmetro Real e Diâmetro da Nuvem



Fonte: O Autor (2023).

O cálculo de correlação de Pearson (figura 26) foi constatado que há correlação entre os volumes, sendo este tendo um valor de 0,868. O valor de p (p-value) foi menor que 0,000, pelo teste de hipótese ANOVA, contribuindo que esses diâmetros são estatisticamente iguais.

6.3 Análise de RMSE dos volumes Real e Volume pela Superfície TIN

A Tabela 1 mostra o RMSE e RMSE% entre o Volume obtido por cubagem Rigorosa (Real) e o Volume obtido por meio da superfície TIN

Tabela 1 – Análise de RMSE entre Volume Real e Volume da Robótica

	Ambas as Linhas	Linha 1	Linha 2	Ambas as Linhas Corrigidas	Linha 1 Corrigida	Linha 2 Corrigida
RMSE	0,03483	0,03153	0,04001	0,0254	0,03162	0,0201
RMSE%	45,1687%	39,1550%	51,3967%	32,9701%	37,6692%	23,2306%

Fonte: O Autor (2023).

Foi constatado que há dentro das medições erro sistemático, mas que não foi possível encontrar de onde se derivou esse erro. Depois de realizar a correção dos volumes, foram

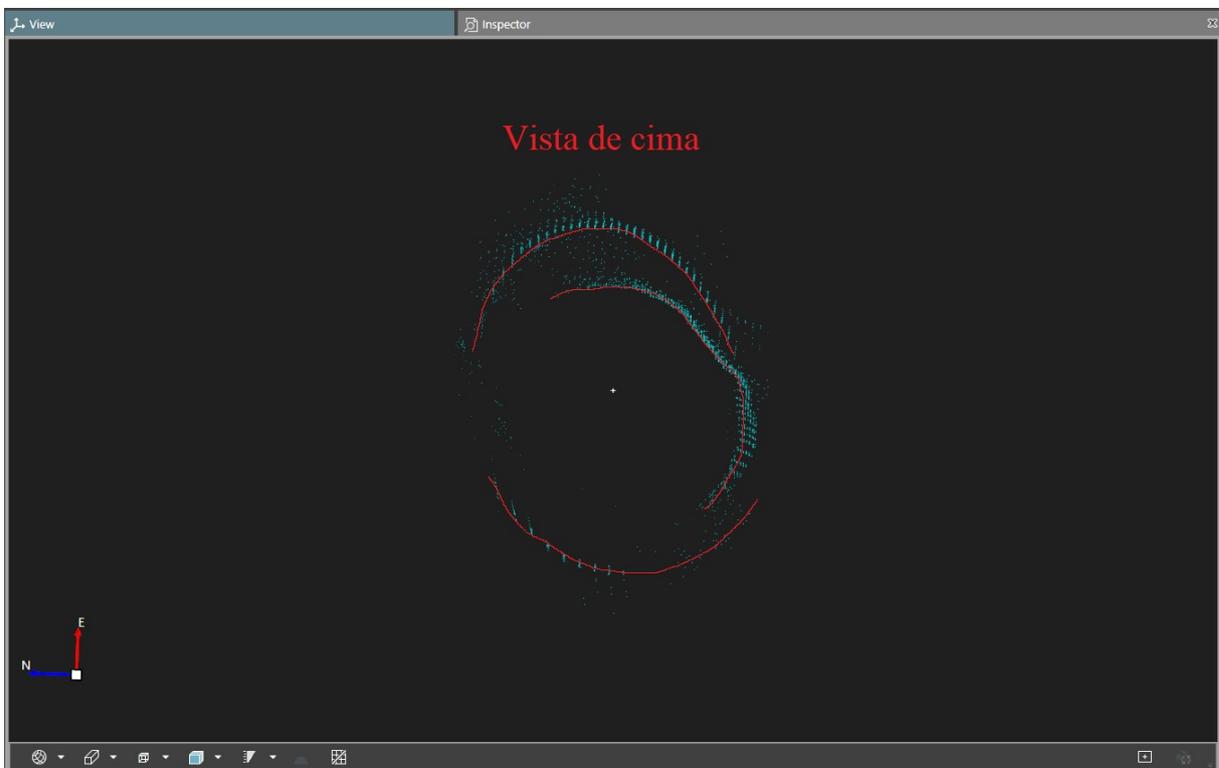
encontrados valores menores que 33 % para ambas as linhas. Observa-se também que a linha 2 por ter mais normalidade dos dados que a linha 1, foi possível observar que a linha 2 errou menos que a linha 1 após a retirada do erro médio.

Durante o processo da utilização do equipamento, foi constatado em campo que o equipamento possui descalibração entre as ortogonalidades entre o eixo principal, secundário e de colimação. No entanto a ETR possui um compensador embutido, e faz com que as distancias e ângulos mensurados sejam compensados. Sendo é um fator que contribuiu para que o RMSE fosse alto.

Durante os dias 14 e 15 de abril de 2023, as quais foram os dias de levantamento em campo com a ETR, notou-se uma grande movimentação da copa das árvores devida a fator meteorológico, o vento. Com a movimentação das árvores, as superfícies geradas pelo *Software Leica Infinity* não o tornaram acurada, por isso é mais um fator que contribuiu para que o RMSE fosse alto.

A figura 27 a seguir mostra a vista de cima da árvore 12 da linha 1 da seção 4,0 m – 4,5 m.

Figura 27 – Vista de cima da Árvore 12 da Linha 1 da seção de 4,0 m a 4,5 m



Fonte: O Autor (2023).

Nota-se na Figura 27, que não há um encontro da nuvem de pontos na árvore, e há um deslocamento, e esse deslocamento é mais perceptível em seção das árvores que está mais alta, e por isso essa não união da nuvem de pontos causa erros de estimação na superfície TIN gerada, e também, é um fator que contribuiu para que tivesse uma superestimação do volume por parte da ETR.

6.4 Análise de RMSE dos diâmetros Real e Diâmetro medido na nuvem de pontos

6.4.1 Linha 1

A tabela 2 a seguir mostra o RMSE e RMSE% dos diâmetros medidos em campo com os diâmetros medidos na nuvem de pontos da Linha 1.

Tabela 2 – Análise de RMSE entre Diâmetro Real e Diâmetro da Nuvem de Pontos – L1

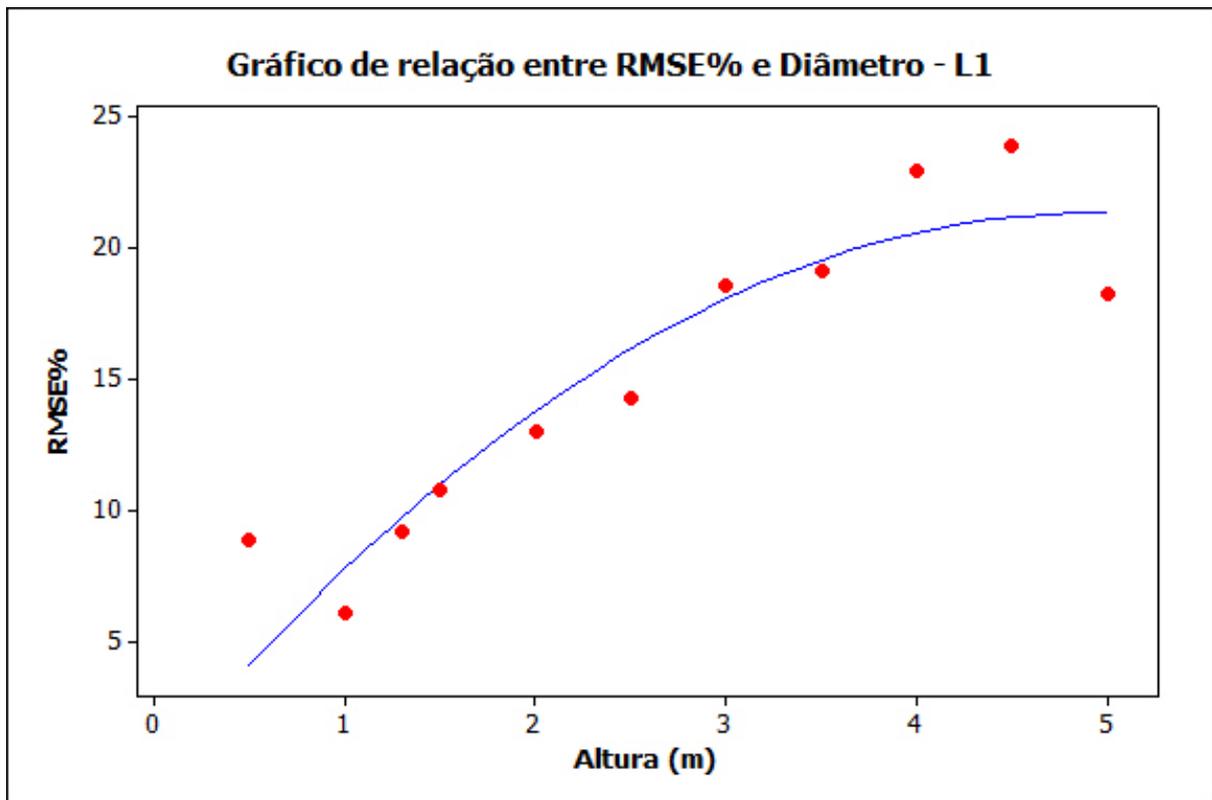
Seção	RMSE	RMSE%
0,5 m	1,58558424	8,8367%
1,0 m	1,044868711	6,1208%
1,3 m	1,543636547	9,1557%
1,5 m	1,777388665	10,7527%
2,0 m	2,100127538	13,0226%
2,5 m	2,232175914	14,2361%
3,0 m	2,828067925	18,5299%
3,5 m	2,849014832	19,1316%
4,0 m	3,313227798	22,9500%
4,5 m	3,374952594	23,9046%
5,0 m	2,496231393	18,2463%

Fonte: O Autor (2023).

Na tabela 2, mostra que o RMSE% na altura do DAP, foi menor que 10%. Mas que há um aumento do RMSE conforme as seções vão ficando mais alta, por conta da inclinação do eixo de colimação da ETR.

Na Figura 28 mostra essa relação entre RMSE% e Diâmetro.

Figura 28 – Gráfico de relação entre RMSE% e Diâmetro – L1



Fonte: O Autor (2023).

A figura 28 mostra uma curva que pode ser ajustada para uma curva logarítmica, e quando chega a certo valor ela se estabiliza em um valor fixo.

6.4.2 Linha 2

A tabela 3 a seguir mostra o RMSE e RMSE% dos diâmetros medidos em campo com os diâmetros medidos na nuvem de pontos da Linha 2.

Tabela 3 – Análise de RMSE entre Diâmetro Real e Diâmetro da Nuvem de Pontos – L2

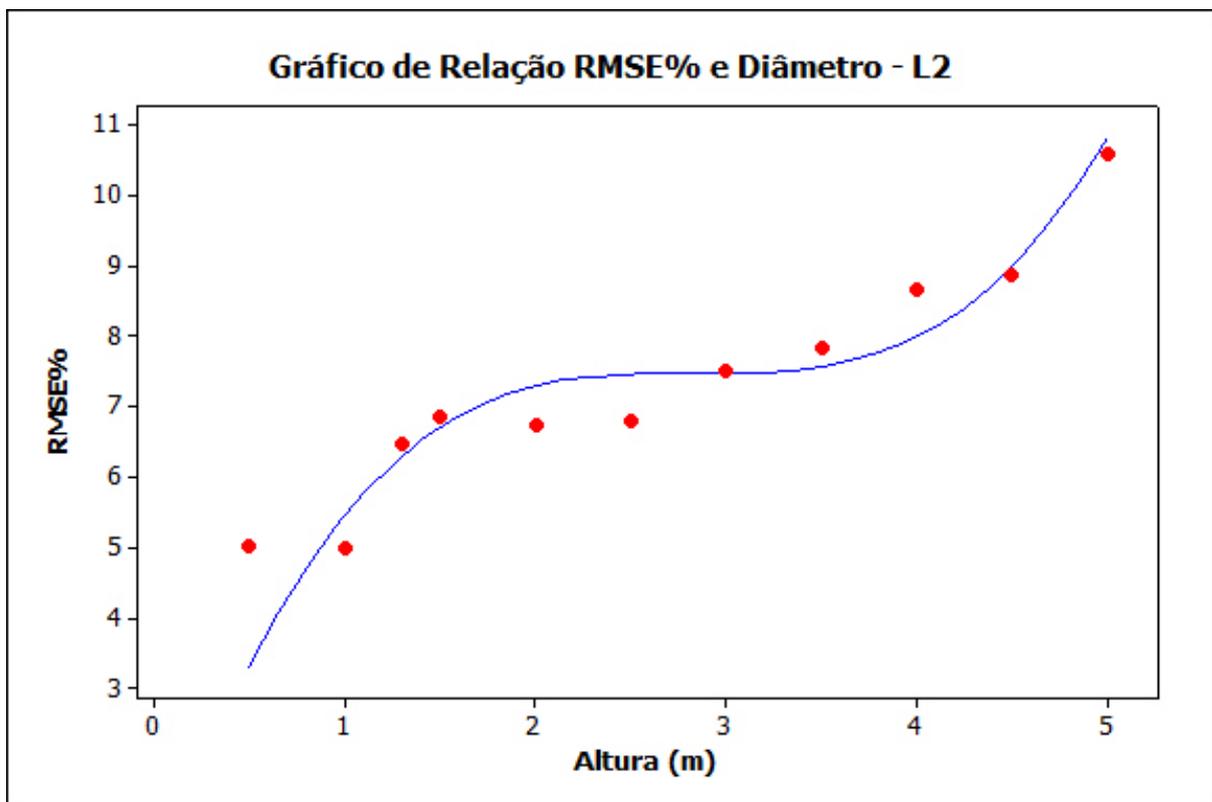
Seção	RMSE	RMSE%
0,5 m	0,834973769	5,0068%
1,0 m	0,79822924	4,9875%
1,3 m	1,017441662	6,4611%
1,5 m	1,064227922	6,8441%
2,0 m	1,02555458	6,7432%
2,5 m	1,012831935	6,7838%
3,0 m	1,10331294	7,5099%
3,5 m	1,112911856	7,8122%
4,0 m	1,198883394	8,6468%
4,5 m	1,198556965	8,8762%

5,0 m	1,403005988	10,5706%
--------------	-------------	----------

Fonte: O Autor (2023).

Pode-se notar na tabela 3, que o DAP foi menor que 7%. Mas que há um aumento do RMSE conforme as seções vão ficando mais alta. E diferentemente da linha 1, a linha 2 é mais acurada devido ao fato do espaçamento entre as árvores ser maior, isso ajudou na aquisição dos dados tridimensionais e não haver sombreamento.

Figura 29 – Gráfico de relação entre RMSE% e Diâmetro – L2



Fonte: O Autor (2023).

A figura 29 mostra uma curva que pode ser ajustada para uma curva cúbica. Conforme as tabelas 2 e 3, é possível observar que as mensurações de diâmetro ao longo do fuste têm acurácia melhor nas partes mais baixas, e conforme as seções vão ficando mais alta, nota-se a imprecisão do equipamento principalmente no eixo de colimação.

Para Faggion(2011), um erro de linha de visada consiste no erro entre a ortogonalidade entre o eixo secundário, principal e de colimação(visada), e foi comprovado que visadas no ângulo vertical maiores que 45° pode afetar o ângulo horizontal cerca de 24,8". Os escaneamentos realizados na linha 1 e linha 2, possuiu visadas de ângulos verticais maiores que 45°, chegando próximo aos 90° na linha 1.

Já na linha 2, como os pontos de apoios não estavam dentro da rua, a ETR não realizou medição tão brusca em relação ao ângulo vertical, então isso contribuiu para que o RMSE% fosse mais baixo em relação a linha 1. Além do mais, a Linha 2 possui espaçamentos diferentes da Linha 1.

Outro fator que teve influência na imprecisão dos diâmetros em seções mais altas é a oclusão da nuvem de pontos por árvores e galhos, por conta que a floresta está muito adensada e isso causa a oclusão da visada da ETR, ocasionando também imprecisão no método. Para Lingnau et al. (2008) a situação ideal é um povoamento florestal menos denso, para que a varredura não tenha sombreamento.

Dentro do setor de manejo florestal o DAP, é uma variável bastante importante, pois com ela e com fatores de forma da árvore conhecidas e altura, é possível realizar o cálculo de volume de forma mais precisa. Principalmente em florestas plantadas como o eucalipto, e por ele ser uma árvore que possui um fuste mais próximo do cilíndrico, isso contribui que fatores de forma da árvore, DAP e altura sejam empregados em grandes escalas para o cálculo de volume madeireiro.

Como o RMSE% do diâmetro a 1,30 m da linha 1 e linha 2 foram abaixo dos 10%, pode-se atribuir que a ETR realiza mensurações acuradas com um nível de precisão de 10% no que diz respeito ao DAP. E isso corrobora com a citação de Faggion(2011), visto que, em geral a ETR é posicionada a uma altura de 1,3 a 1,7 metros, e isso contribui para que o ângulo vertical sempre se mantenha na linha do horizonte, onde o erro de colimação é menor.

6.5 Análise de RMSE dos Volumes Real e Volume por Smalian medido na nuvem de pontos

6.5.1 Linha 1

A Tabela 4 a seguir mostram o RMSE e RMSE% entre o Volume Real, e os Volume da Nuvem de Pontos calculado através dos diâmetros mensurados na nuvem de pontos utilizando a fórmula de Smalian da Linha 1.

Tabela 4 – Análise de RMSE entre Volume Real e Volume da Nuvem de Pontos (Smalian) – L1

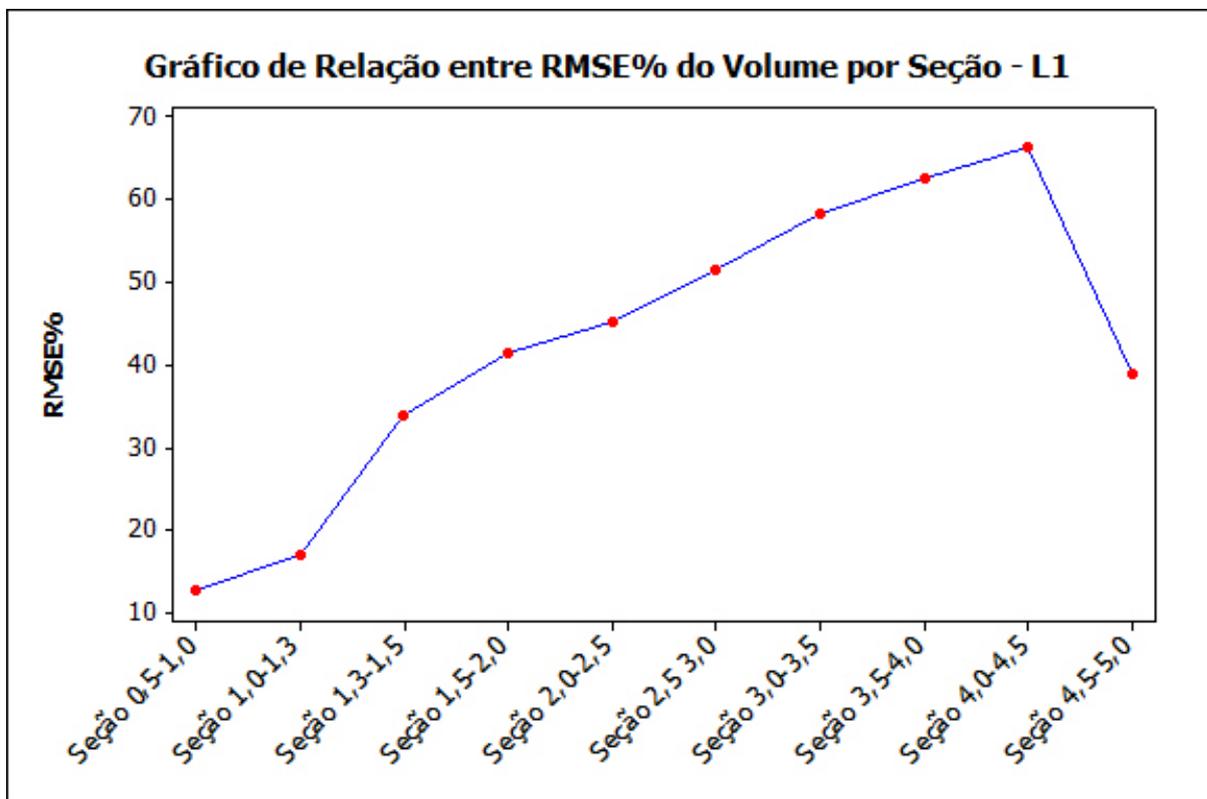
Seção	RMSE	RMSE%
0,5 m – 1,0 m	0,00149371	12,7349%
1,0 m – 1,3 m	0,001124852	17,0205%
1,3 m – 1,5 m	0,00144298	33,8154%
1,5 m – 2,0 m	0,00422944	41,4135%
2,0 m – 2,5 m	0,004377796	45,0929%
2,5 m – 3,0m	0,004734775	51,4938%
3,0 m – 3,5 m	0,005084781	58,2257%
3,5 m – 4,0 m	0,005162379	62,4801%
4,0 m – 4,5 m	0,005182202	66,2636%
4,5 m – 5,0 m	0,002880927	38,8056%

Fonte: O Autor (2023).

A tabela 4 mostra que o RMSE% principalmente na altura do DAP foi maior que 30%, e que há um certo aumento conforme o volume da seção vai aumentando de altura.

A figura 30 mostra um gráfico de relação entre RMSE% e Volume por seção da linha 1.

Figura 30 – Gráfico de relação entre RMSE% do Volume por Seção – L1



Fonte: O Autor (2023).

Nota-se na figura 26, que há um crescimento do erro, conforme as seções ficam mais altas. Esse fator se deve ao fato a distância entre o sensor ativo e o alvo é um fator que influencia diretamente na qualidade da obtenção de dados tridimensionais. (MARTINS NETO et al. 2013)

6.5.2 Linha 2

A Tabela 5 a seguir mostra o RMSE e RMSE% entre o Volume Real, e os Volume da Nuvem de Pontos calculado através dos diâmetros mensurados na nuvem de pontos utilizando a formula de Smalian da Linha 2.

Tabela 5 – Análise de RMSE entre Volume Real e Volume da Nuvem de Pontos (Smalian) –

L2

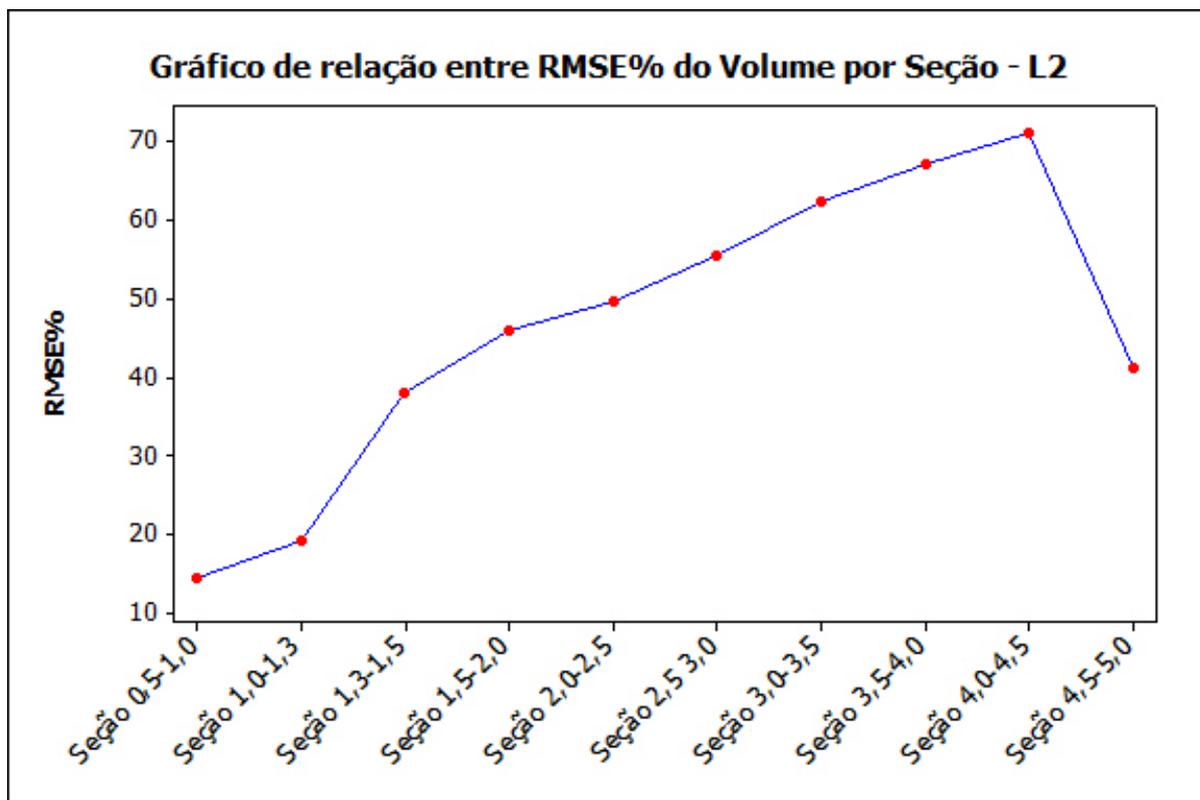
Seção	RMSE	RMSE%
0,5 m – 1,0 m	0,00149371	14,41277177
1,0 m – 1,3 m	0,001124852	19,15275326
1,3 m – 1,5 m	0,00144298	37,89248612
1,5 m – 2,0 m	0,00422944	45,96916622
2,0 m – 2,5 m	0,004377796	49,58806305
2,5 m – 3,0m	0,004734775	55,54520503
3,0 m – 3,5 m	0,005084781	62,42558739
3,5 m – 4,0 m	0,005162379	67,12659733
4,0 m – 4,5 m	0,005182202	71,14570959
4,5 m – 5,0 m	0,002880927	41,27955376

Fonte: O Autor (2023).

A tabela 5 mostra que o RMSE% principalmente na altura do DAP foi maior que 35%, e que há um certo aumento conforme o volume da seção vai aumentando de altura.

A figura 31 mostra um gráfico de relação entre RMSE% e Volume por seção da linha 1.

Figura 31 – Gráfico de relação entre RMSE% do Volume e Seção – L2



Fonte: O Autor (2023).

Conforme apresentado nas tabelas 4 e 5 e figuras 26 e 27, é possível notar uma discrepância entre os volumes medidos por cubagem rigorosa e por os volumes medidos pela nuvem de pontos. Não somente isso, mas também, o erro é maior conforme a árvore vai aumentando de altura.

Para Martins Neto et al. (2013), a distância entre o sensor ativo e o alvo é um fator que influencia diretamente na qualidade da obtenção de dados tridimensionais. Neste estudo a distância máxima escaneada foi de 40 metros. Em projetos futuros cabe um estudo aprofundando de escaneamento com distâncias menores e com pontos de apoio para escaneamentos mais diversificados. Para se obter um melhor resultado nas variáveis dendrométricas, é necessário que sejam filtradas quaisquer ruídos e falhas ao longo do fuste (LINGNAU, 2009).

Para Buck (2012), o laser scanner terrestre, obteve resultados acurados até uma altura de 4 metros quando comparado com a técnica do Xilometro. Após os 4 metros o volume obtido pelo laser, obteve-se uma superestimação, e isso se deu ao fato da presença de galhos e acículas.

Os eucaliptos deste do estudo, não possuía podas em nenhum nível de altura, com isso os galhos secos e cascas mortas da árvore influenciaram diretamente o modelo de superfície TIN para calcular o volume madeireiro.

Como para os diâmetros e também para o volume, ambos as análises são que conforme as seções vão ficando mais alto maior o erro. Isso se deve ao fato da angulação brusca da ETR que ocasiona erro, de oclusão de galhos e folhas, pelo fato de que o povoamento é bastante denso, não somente, mas fator metrológico influenciou diretamente os modelos de superfície e até mesmo na parte de mensuração de diâmetro da nuvem de pontos.

7 CONCLUSÃO

No que tange ao abordado, conclui-se que a ETR consegue realizar medições de diâmetro à altura de 1,30 m (DAP) a uma precisão menor que 10% quando comparado com medições diretas (Cubagem Rigorosa).

Fatores como o vento influenciam diretamente na nuvem de pontos obtidas pela ETR, e causa imprecisão no método.

Angulações muito próximas do Zenith ou Nadir do equipamento, também agrega erros nos métodos de mensurações indiretas. Não somente, mas como distância muitos longos, também afeta o método de obtenção de medidas indiretas.

Apesar de todo o levantamento em campo ter sido realizado em 9 horas, caso algum trabalho futura necessite somente de DAP, a ETR possui uma precisão que realiza o levantamento em menos tempo, quando comparado com técnicas de medições diretas (fitas e Sutas).

Em trabalhos futuros, é uma recomendação que os escaneamentos a laser, não possua uma elevação do ângulo vertical tão brusco, que as distâncias entre ETR e alvo sejam menores, que o projeto possua mais pontos de controle para mais ângulos de escaneamentos do fuste. Além disso, ter um melhor monitoramento do vento, que foi um fator que contribuiu com uma grande parte do erro, e por isso, realizar os escaneamento em dias com menos vento.

Ressalta-se que esse trabalho foi utilizado uma Estação Total Robótica com aplicação de Laser Scanner, a qual esse equipamento possui limitações quando comparados com Laser Scanner Terrestres apropriado para realizar um escaneamento.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Gustavo José Ferreira de. **Uso do laser scanner terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em povoamentos florestais**. 2017. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Silvicultura e Manejo Floresta, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.
- ALVES JÚNIOR, Leomar Rufino. **Comparação de sistemas imageadores aerotransportados ópticos e LiDAR para quantificação da biomassa em áreas de Cerrado nativo**. 2021. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.
- ANAIS DO MUSEU PAULISTA, 27., 2019, São Paulo. **Aplicações das tecnologias Laser Scan e aerofotogrametria por drone para museus**. São Paulo: Nova Série, 2019. 28 p.
- BEIRÃO, Carla Castello Branco. **O POTENCIAL DO LASER SCANNER TERRESTRE PARA O INVENTÁRIO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- BUCK, André Leonardo Bortolotto et al. Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados laser terrestre / Evaluation of three-dimensional trunk modeling of *Pinus elliottii* from terrestrial laser data. **Revista Ambiência**, [S.L.], v. 8, n. , p. 549-557, 18 out. 2012. GNI Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5777/ambiencia.2012.04.09>.
- BUCK, André Leonardo Bortolotto et al. Stem Modelling of Eucalyptus by Terrestrial Laser Scanning. **Floresta e Ambiente**, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 1-10, abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.012516>.
- CAMPOS, João Carlos Chagas; LEITE, Helio Garcia. **MENSURAÇÃO FLORESTAL: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013. 605 p.
- CARDOSO, Denise Jeton; RIBASKI, Jorge. O uso do dendrômetro “Criterion” para quantificação do volume por método não destrutivo. 21. ed. Colombo, Pr: Embrapa, 2015.
- DALMOLIN, Quintino; SANTOS, Daniel Rodrigues dos. **Sistema laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento** (3ª edição). Curitiba: UFPR, 2004. 97p.
- DEL-CAMPO-SANCHEZ, Ana et al. Geometric Characterization of Vines from 3D Point Clouds Obtained with Laser Scanner Systems. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 20, p. 2365, 12 out. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11202365>.
- FAGGION, Pedro Luís. **CONSIDERAÇÕES SOBRE A INSTRUMENTAÇÃO TOPOGRÁFICA: disciplina de levantamentos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2011. 61 p.
- FIGUEIREDO, Evandro Orfanó et al. Modelos para estimativa de volume de árvores individuais pela morfometria da copa obtida com lidar. **CERNE**, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 621-628, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201420041693>.

- FLORIANO, Eduardo Pagel; PAULA NETO, Francisco de. **DENDROMETRIA**. 2. ed. Rio Largo: Autor, 2021. 170 p.
- FONSECA, Alessandra Lopes Braga. **ESTIMAÇÃO DE VOLUME DE MADEIRA EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO UTILIZANDO DADOS DE LASER SCANNER TERRESTRE**. 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Mg, 2018. Cap. 1.
- IBGE. **Relatório de Estação Geodésica - 99657**. 2017. Disponível em: <http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/pdf/relatorio.asp?L1=99657>. Acesso em: 07 jan. 2023.
- LEICA GEOSYSTEMS® a. **Leica MS50/TS50/TM50 User Manual**. Manual do usuário, versão 1.1.1, inglês. Disponível em: . Acesso em: 30/11/2018.
- INOUE, Tomoharu et al. Unmanned aerial survey of fallen trees in a deciduous broadleaved forest in eastern Japan. **PLoS one**, v. 9, n. 10, p. e109881, 2014.
- LIMA, Gean Carlos Paia et al. ACURACIDADE DE MÉTODOS DE CUBAGEM PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DE Pinus taeda L. **Biofix Scientific Journal**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 74-82, dez. 2016.
- LINGNAU, Christel et al. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. **Ambiência: Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v. 4, n. 2008, p. 85-96, jun. 2008
- LINGNAU, Christel et al. Determinação de diâmetros em diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, Brasil. **Anais [...]**. Natal: Inpe, 2009. p. 5031-5038.
- MACIEL, Jessé Burlamaque. **QUALIDADE DOS PRODUTOS DE AEROFOTOGRAMETRIA POR DRONE PARA UMA FLORESTA MADURA NA AMAZÔNIA CENTRAL**. 2022. 52 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - Inpa, Manaus, 2022.
- MACHADO, Sebastião do Amaral et al. COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE CUBAGEM ABSOLUTOS COM O VOLUME OBTIDO PELO XILÔMETRO PARA BRACATINGA: (*mimosa scabrella bentham*). **Cerne**, Lavras, Brasil, v. 12, n. 3, p. 239-253, jul. 2006.
- SOBRINHO, Marcos et al. USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT) PARA MENSURAÇÃO DE PROCESSOS FLORESTAIS. **Enciclopédia Biosfera**, [S.L.], v. 15, n. 27, p. 117-129, 20 jun. 2018. Centro Científico Conhecer. http://dx.doi.org/10.18677/encibio_2018a80.
- MARTINS NETO, Rorai Pereira et al. Avaliação da varredura laser terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 420-433, set. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702013000300005>.

- MAULONI, Juliana Aparecida et al. Investigação fotogramétrica em imagens digitais para cálculos dendrométricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: Inpe, 2011. p. 2368-2374.
- MEDEIROS, Fabrício Ardais. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- OLIVEIRA, Luciano Teixeira de et al. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 49, n. 9, p. 692-700, set. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2014000900005>.
- SILVA, José Antônio Aleixo da; PAULA NETO, Francisco de. **PRINCIPIOS BÁSICOS DE DENDROMETRIA**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1979. 191 p.
- SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL, 8., 2016, Sinop. **A Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa**. Sinop: S Daniel Carneiro de Abreu Et Al., 2016. 214 p.
- TOPCON. **HIPER V RECEPTOR GNSS DE FUNÇÃO VERSÁTIL**: manual do equipamento. Manual do Equipamento. 2016. Disponível em: https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/hiper_v_broch_7010_2121_rev_d_ptbr_sm.pdf. Acesso em: 07 jan. 2023.
- VIEIRA, João Paulo. **COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS TOPOGRÁFICOS PARA FINS DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS. ESTUDO DE CASO: UHE EMBORCAÇÃO**. 2018. 67 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2018.
- WUTKE, Juliana Dias. **Métodos para a Avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre**. Dissertação na Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Curitiba, 2006
- ZANETTI, Juliette. **INFLUÊNCIA DO NÚMERO E DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE EM ORTOFOTOS GERADAS A PARTIR DE UM LEVANTAMENTO POR VANT**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa., Viçosa, 2017.
- ZUCON, Ana Rosária Scifó et al. Use of unmanned aerial vehicle images as a tool to evaluate stand uniformity in clonal Eucalyptus plantations. **Anais do XVII Simpósio Bras Sensoriamento Remoto-SBSR, João Pessoa INPE**, p. 6381-6388, 2015.

APÊNDICE

Link:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1JXCE_eCmBVypi7MX1z_T4t8eKa_upNybV18CrdnCzk/edit?usp=sharing