



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

KLISMAN OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DE DIÂMETRO E ALTURA TOTAL DE PLANTIO MISTO COM LASER
SCANNER PORTÁTIL

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

KLISMAN OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DE DIÂMETRO E ALTURA TOTAL DE PLANTIO MISTO COM LASER
SCANNER PORTÁTIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Dr. Gilson Fernandes da Silva

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

O48a Oliveira, Klisman, 1995-
Avaliação de diâmetro e altura total de plantio misto com laser scanner portátil / Klisman Oliveira. - 2022.
84 f.

Orientador: Gilson Fernandes da Silva.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Engenharia Florestal. 3. Restauração. 4. Manejo. 5. Inventários. 6. Ecologia Florestal. I. Fernandes da Silva, Gilson. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. III. Título.

CDU: 630

AVALIAÇÃO DE DIÂMETRO E ALTURA TOTAL DE PLANTIO MISTO COM
LASER SCANNER PORTÁTIL

KLISMAN OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Dr. Gilson Fernandes da Silva

Aprovado em 29 de agosto de 2022

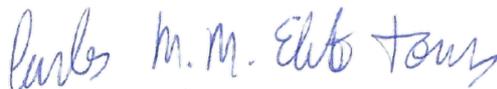


Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo



Documento assinado digitalmente
ANDRE QUINTAO DE ALMEIDA
Data: 18/11/2022 10:33:09-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. André Quintão de Almeida
Universidade Federal do Sergipe



Prof. Dr. Carlos Moreira Miquelino Eleto Torres
Universidade Federal de Viçosa

Dedico

À minha família, em especial
aos meus pais que tanto me
apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais Almir Ferreira de Oliveira e Maria Oséia Busato de Oliveira, por todo incentivo, apoio e confiança prestada ao longo de toda a vida dedicada aos estudos e academia.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo pelas instalações, equipamentos e suporte oferecidos ao longo de todo período de elaboração do projeto.

Ao Laboratório de Manejo Florestal (LAMFLOR) em especial ao meu orientador, Professor Doutor Gilson Fernandes da Silva e ao Professor Doutor André Quintão de Almeida por todo apoio e conhecimento adquirido ao longo do desenvolvimento da dissertação. Como também a todos os membros do LAMFLOR com que convivi diariamente no laboratório, em momentos de desenvolvimento de pesquisas e trabalhos como também naqueles momentos de cafés e conversas.

Também ao Grupo de Estudos em Economia Ambiental e Manejo Florestal (GEEA) e ao Programa Carbono Zero, em especial aos professores Doutor Laércio Antônio Gonçalves Jacovine e Doutor Carlos Moreira Miquelino Eleto Torres, que prestaram apoio e conselhos desde o princípio do projeto. Também fica o agradecimento a todos os membros, estagiários, bolsistas e pós-graduandos do GEEA e Carbono Zero, pela disponibilidade e suporte para as coletas de dados.

Enfim agradeço a todos que incentivaram e contribuíram ao longo dos mais de dois anos de trajetória e faz dela mais uma etapa concluída da minha vida.

RESUMO

OLIVEIRA, Klisman. **AVALIAÇÃO DE DIÂMETRO E ALTURA TOTAL DE PLANTIO MISTO COM LASER SCANNER PORTÁTIL**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Dr. Gilson Fernandes da Silva.

A utilização de equipamentos do sensoriamento remoto vem crescendo no cenário florestal, associada a economia de tempo e redução dos trabalhos de campo que podem trazer aos projetos, um desses é o *Light Detection and Ranging* (LiDAR). O objetivo do presente trabalho foi estimar a altura total e o diâmetro à altura do peito de diferentes espécies em um povoamento florestal misto com dados *Light Detection and Ranging*. A pesquisa foi desenvolvida em uma área de restauração florestal em plantio misto em Viçosa, Minas Gerais. Foi realizado o inventário florestal para coleta de diâmetro à altura do peito e altura total, de doze espécies distintas da Mata Atlântica, sendo coletados dez centros de classe por espécies, totalizando 120 indivíduos arbóreos mensurados. As coletas ocorreram por meio de um *Portatil Laser Scanner* (PLS), foi realizado o caminhamento com o equipamento nas oito áreas estudadas, variando de dois a dez anos de idade. Por meio do caminhamento foi possível gerar a nuvem de pontos 3D dos plantios, de onde foi realizado a segmentação e limpeza das árvores estudadas, gerando assim uma nuvem de pontos para cada árvore isolada. Por meio dos pacotes TreeLS e LiDR do *software R* foi possível extrair as métricas de diâmetro à altura do peito e altura total das nuvens de pontos de cada árvore. Ao final da segmentação, foram isoladas 92 árvores de onze espécies distintas, dentre os problemas encontrados para o isolamento das árvores, a competição dos plantios mais jovens com plantas daninhas e árvores invasoras se destacou. Outro problema encontrado foi a competição entre copas, levando em consideração o entrelaçamento entre copas e obstrução dos lasers por obstáculos, o que gerou oclusões e ruídos, o que inviabilizava o isolamento das árvores. Para a métrica de diâmetro, as espécies de modo geral, o RMSE alcançou um valor de 38,17%, a espécie *Schizolobium parahyba* obteve as melhores estatísticas chegando a um RMSE de 13,14% e Viés 40,65%. As melhores estatísticas que o *Schizolobium parahyba* chegou podem estar associadas à semelhança de

crescimento com as espécies comerciais, de onde são geralmente que são processadas as métricas nos pacotes utilizadas. Para os dados de altura total obtidos com PLS o RMSE (%) geral foi de 15,14 %, enquanto seu Viés (%) foi de 17,73 %, em que quatro espécies estudadas obtiveram RMSE (%) abaixo de 10%, sendo elas a *Ceiba speciosa*, *Inga edulis*, *Tibouchina granulosa* e *Cedrela fissilis*, sendo o *C. fissilis* a única espécie com o RMSE (%) abaixo de 5%. As espécies no geral apresentaram resultados superestimados de diâmetros à altura do peito e dificuldade de segmentação das árvores, já as métricas de altura total foram obtidas com maior precisão, e semelhante às estatísticas encontradas na literatura.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; inventário florestal; variáveis florestais; manejo florestal; nuvem de pontos.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Klisman. **EVALUATION OF DIAMETER AND TOTAL HEIGHT OF MIXED PLANTING WITH PORTABLE LASER SCANNER**. Dissertation (Master's degree in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Dr. Gilson Fernandes da Silva.

The use of remote sensing equipment has been growing in the forestry scenario, associated with time savings and reduction of field work that can bring to projects, one of which is Light Detection and Ranging (LiDAR). The objective of the present work was to estimate the total height and diameter at breast height of different species in a mixed forest stand with Light Detection and Ranging data. A forest inventory was carried out to collect diameter at breast height and total height, from twelve different species of the Atlantic Forest, being collected ten class centers by species, totaling 120 measured arboreal individuals. The collections took place by means of a Portable Laser Scanner (PLS), the walking was carried out with the equipment in the eight areas studied, ranging from two to ten years of age. Through the walking, it was possible to generate the 3D point cloud of the plantations, from where the segmentation and cleaning of the studied trees was carried out, thus generating a point cloud for each isolated tree. Through the TreeLS and LiDR packages of the R software, it was possible to extract the metrics of diameter at breast height and total height of the point clouds of each tree. At the end of the segmentation, 92 trees of eleven different species were isolated, among the problems found for the isolation of the trees, the competition of the younger plantations with weeds and invasive trees. Another problem found was the competition between crowns, taking into account the intertwining between crowns and obstruction of the lasers by obstacles, which generated occlusions and noise, which made it impossible to isolate the trees. For the diameter metric, species in general the RMSE reached a value of 38.17%, the species *Schizolobium parahyba* obtained the best statistics reaching an RMSE of 13.14% and Bias 40.65%. The best statistics that *Schizolobium parahyba* arrived at can be associated with the similarity of growth with commercial species, from which the metrics in the used packages are usually processed. For the total height data obtained with PLS, the general RMSE (%) was 15.14

%, while its bias (%) was 17.73 %, in which four studied species obtained RMSE (%) below 10%, being *Ceiba speciosa*, *Inga edulis*, *Tibouchina granulosa* and *Cedrela fissilis*, being *C. fissilis* the only species with RMSE (%) below 5%. The species in general showed overestimated results of diameters at breast height and difficulty in segmenting the trees, whereas the total height metrics were obtained with greater precision, and similar to the statistics found in the literature.

Keywords: remote sensing; forest inventory; forest variables; forest management; point cloud.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivo específico.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Inventário Florestal.....	14
3.1.1 Tipos de Inventários Florestais.....	14
3.1.2 Tecnologia LiDAR empregada para o inventário florestal.....	16
3.1.3 Pacotes e programas para processamento de dados LiDAR para florestas.....	21
3.1.4 Custos do inventário florestal com sensoriamento remoto	22
3.2 Estimação de altura e diâmetro em Inventários Florestais	24
3.2.1 Medição de diâmetro para espécies nativas.....	25
3.2.2 Medição de diâmetro para espécies nativas	28
4. METODOLOGIA.....	33
4.1 Descrição da Área.....	34
4.2 FASE I: Inventário piloto e seleção de espécies	35
4.3 FASE II: DAP e HT coletados por método convencional e PLS	46
4.3.1 FASE II: DAP e HT coletados por inventário tradicional	47
4.3.2 FASE II: DAP e HT obtidos por meio de PLS	47
4.4 FASE III: Processamento de dados LIDAR	48
4.4.1 FASE III: Obtenção da árvore isolada	49
4.4.2 FASE III: Processamento e obtenção dos dados de DAP e HT	52
4.5 FASE IV: Análises Comparativas	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
5.1 Obtenção dos dados de parcela e árvores isoladas.....	54
5.2 Análise dos dados de DAP do peito por meio do PLS.....	59
5.3 Análise dos dados de altura total por meio do PLS	66
6. CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

Por meio do manejo florestal é possível realizar o acompanhamento e avaliação do crescimento de florestas comerciais e nativas (CAMPOS; LEITE, 2013). Pesquisas e informações sobre as variáveis básicas de monoculturas já são amplamente difundidas no meio florestal, já para florestas nativas e plantios mistos, os estudos e informações são mais escassos (CEZANA *et al.*, 2012; PINTO JÚNIOR; SILVEIRA, 2021; MIRANDA *et al.*, 2019; TONINI *et al.*, 2019). Isso se deve principalmente porque formações florestais naturais e plantios mistos apresentam maior dificuldade para manejar e se estabelecer (LE *et al.*, 2021; RUSSO *et al.*, 2020).

Os plantios mistos são áreas de coexistência de duas ou mais espécies florestais, podendo ser elas nativas ou exóticas (PIOTTO, 2008; WEST, 2014). A técnica é adotada em áreas de restauração e neutralização, buscando recomposição da vegetação, muitas vezes degradada, trazendo melhorias as condições ambientais (FARIA *et al.*, 2018). A adoção de plantios mistos em área de restauração pode apresentar vantagens, como a melhor performance em áreas degradadas do que monoculturas, tanto para altura, diâmetro e biomassa da madeira (PRETZSCH *et al.*, 2021; THOMAS *et al.*, 2021).

O monitoramento das áreas de restauração ocorre comumente por meio dos inventários e florestais, o que leva em consideração as variáveis dendrométricas básicas. As métricas de grande relevância, obtidas por meio do inventário, são o diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total (HT) das árvores (WHITE *et al.*, 2016). Por meio das variáveis básicas dos indivíduos é possível gerar estimativas mais complexas, como é o caso do volume de madeira, biomassa e estoque de carbono (MELO; DURINGAN, 2006; WHITE *et al.*, 2016). Além de contribuir com a estimativa de variáveis mais complexas da vegetação, o DAP e HT contribuem também para o planejamento e tomadas de decisões acerca da implantação, condução e colheita de florestas (ASSIS *et al.*, 2009).

Uma tecnologia que apresenta potencial para obtenção de métricas florestais, especialmente da HT, é o sensoriamento remoto, com destaque para o *Light Detection and Ranging* (LiDAR). A utilização de ferramentas do

sensoriamento remoto 3D vêm crescendo para obtenção de informações florestais, isso devido à agilidade nas medições com conseqüente redução dos trabalhos de campo realizados no inventário florestal (KERSHAW *et al.*, 2016).

A tecnologia LIDAR vem sendo implementado no cenário ambiental desde 1960 e ao longo dos anos apresenta um gama de plataformas para aquisição de dados (GORGENS; SILVA, 2014). Dentre as plataformas utilizadas podem ser citados: Orbital, *Aerial Laser Scanner*, *Unmanned Aerial Vehicle*, *Terrestrial Laser Scanner*, *Mobile Laser Scanner* e *Personal Laser Scanner* (BELAND *et al.*, 2019; HENTZ, 2018). Cada plataforma apresenta características específicas de resolução espacial, taxas de oclusão e cobertura, fatores esses que distinguem e direcionam a funcionalidade de cada plataforma (DALLA CORTE *et al.*, 2022).

Pesquisas com o uso do *Portatil Laser Scanner* (PLS) para árvores individuais já veem sendo implementadas, justamente pela capacidade de resolução dos equipamentos que chegam a um tamanho de pontos de 0,01-0,005 metros, distância de pontos de 0,05-0,05 metros e recobrimento de área de 0,25-5,0 hectares (BELAND *et al.*, 2019). E há a possibilidade de incorporar ao PLS, como também em outras plataformas, a tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), tecnologia essa que permite o posicionamento dos pontos gerados em campo sem a necessidade de sistemas de posicionamentos externos como o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) (ALSADIK; KARAM, 2021). O SLAM facilita as coletas em campo, principalmente em floretas densas, em que processos com coletas com GNSS são complexas, já que o sinal do equipamento em florestas fechadas é comumente perdido (BALENOVIC, 2021).

Dentre outras vantagens o LiDAR pode contornar a questão de limitação dos tamanhos de amostras em áreas de alto valor ecológico e econômico, já que não apresenta necessidade de derrubada de árvores para realização da cubagem destrutiva (STOVALL, *et al.*, 2017). A tecnologia LiDAR no setor florestal pode trazer uma série de facilitações como a alta densidade amostral, capacidade de penetração em espaços reduzidos, sensibilidade a pequenas variações na superfície e a geração de um grande volume de informações em um curto período de tempo (LIANG *et al.*, 2016).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar a altura total e o diâmetro à altura do peito de diferentes espécies em um povoamento florestal misto com dados *Light Detection and Ranging*.

2.2 Objetivo específico

Avaliar método de segmentação de árvores em uma nuvem de pontos obtida por LiDAR em um povoamento florestal misto com vistas a se medir o diâmetro e altura dessas árvores.

Para as árvores individualizadas, avaliar o método manual para medir a altura total das árvores, bem como verificar a acurácia desse método comparados com medidas diretas obtidas com régua telescópica.

Para as árvores individualizadas, avaliar o método automático para se medir o DAP das árvores, verificando-se a acurácia desse método comparado com medidas diretas obtidas com fita métrica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Inventário Florestal

O Manejo Florestal possui uma definição ampla, possuindo diferentes tipos de atividades dentro de sua área (LOCONTE, 2018). Dentre suas diferentes definições, é comum ser abordado como a administração e utilização de uma área com um povoamento florestal, para alcançar um determinado objetivo do proprietário ou sociedade (SFB, 2013). Dessa forma, o manejo florestal tem por objetivo o planejamento eficiente de uma atividade florestal, visando alcançar o máximo de benefícios, buscando a sustentabilidade da área e floresta e se possível seu melhoramento (PEÑA-CLAROS *et al.*, 2008; TAYLOR, 1969).

Uma das bases para os trabalhos desenvolvidos dentro do manejo florestal é o inventário florestal. Com ele é possível avaliar variáveis qualitativas e quantitativas de uma floresta como também suas inter-relações (MELLO; SCOLFORO, 2000; SOARES *et al.*, 2011).

Por meio do inventário florestal é possível obter uma série de variáveis dendrométricas básicas do povoamento, como é o caso do DAP e HT. Com essas informações é possível chegar a outras variáveis de interesse, como é o caso da área basal, volume de madeira, biomassa e estoque de carbono (SOARES *et al.*, 2011). Sendo assim, as informações obtidas com base nos inventários florestais são essenciais no planejamento e tomada de decisões acerca da implantação, condução e colheita de um povoamento florestal (ASSIS *et al.*, 2009).

3.1.1 Tipos de Inventários Florestais

Os inventários podem ser divididos em inventários temporários e contínuos (LIMA, 2018). Os inventários temporários, ocorrem em uma única ocasião, na qual são alocadas parcelas mas não necessitam de inventários posteriores, a técnica é utilizada usualmente para inventário pré-corte

(SOARES *et al.*, 2011). No caso dos inventários florestais contínuos, as parcelas são lançadas e as informações de interesse coletadas, posteriormente, são realizadas medições das parcelas novamente, ocorrem de acordo com o planejamento e necessidades de informações das áreas florestais (GUEDES, 2014).

O inventário florestal pode ser dividido também em inventários do tipo censo ou amostragem (SOARES *et al.*, 2011). No inventário tipo censo, as variáveis de interesse serão mensuradas para todos os indivíduos do povoamento, apresentando assim informações de todos indivíduos arbóreos, contudo, apresenta a desvantagem de apresentar elevado custo de execução, além de possuir elevada demanda de mão de obra e tempo para execução (SOARES *et al.*, 2011). Já no caso de inventários de amostragem, parte da população arbórea é mensurada, que no caso são as amostras e por meio de ajustes estatísticos é possível estimar as variáveis para a floresta (UBIALLI *et al.*, 2009).

Ao amostrar uma determinada floresta, será assumido que o valor médio da variável mensurada é igual a esperança desta variável em qualquer área do povoamento, sendo que o erro gerado é referente a variância das informações amostradas (DINIZ, 2007). Um cuidado ao trabalhar com a amostragem no inventário florestal, são os erros de amostragem e não amostragem, sendo que a análise dos resíduos é fundamental para as análises e tomadas de decisão (LIMA, 2018).

Os tipos de amostragem comumente aplicados no cenário florestal são: amostragem casual simples, amostragem casual estratificada, amostragem sistemática e amostragem multiestágios (SOARES *et al.*, 2011). A amostragem casual simples consiste que uma população será dividida em unidades amostrais, e que as unidades amostrais selecionadas serão escolhidas ao acaso e todas as unidades de amostras possuem a mesma probabilidade de ser amostradas (VIEIRA, 2011).

Para a amostragem casual estratificada, buscando diminuir a variabilidade de uma população heterogênea, as parcelas podem ser divididas em sub-parcelas, que no caso são os estratos (SANQUETTA, C. R. *et al.*, 2009). Uma

vez definido os estratos é possível gerar amostras aleatórias de cada sub-parcela (FONSECA; MARTINS, 1996).

Para a amostragem sistemática consiste em ser lançada as unidades amostrais dentro do povoamento florestal, a primeira unidade amostral será selecionada de forma aleatória (SOARES et al., 2011). Já as demais unidades de amostras serão selecionadas a partir de uma distância definida a partir da primeira unidade de amostra (SCOLFORO *et al.*, 1993).

Por fim o modelo de amostragem por multiestágios, se baseia no lançamento de uma unidade de amostra primária, em sequência é possível lançar uma unidade de amostra secundária restrito a primária, ou seja, lançar a unidade de amostra secundária dentro da primária (SOARES *et al.*, 2011). A partir dos estágios (unidades amostrais lançadas) criados, é possível lançar novos estágios em sequência.

3.1.2 Tecnologia LiDAR empregada para o inventário florestal

Light Detection and Ranging (LiDAR), é uma tecnologia de varredura *laser*. O princípio técnico do LiDAR consiste no equipamento energizar o átomo, e uma vez energizado, retornará para o equilíbrio original, originando o fóton. O fóton ao atingir outros átomos, também serão energizados originando novos fótons, formando um feixe concentrado de fótons de radiação luminosa, que no caso é o *laser* (PINHEIRO *et al.*, 2017). O *laser* ao ser emitido irá atingir a superfície do objeto ou ambiente a ser mensurado, será refletido pela superfície, que retornará para o receptor, disponibilizando informações de intensidade de retorno, distância e ângulos (DUBAYAH; DRAKE, J. B., 2000). Por meio das informações é possível mensurar uma série de variáveis dentro de diversas áreas de atuação.

Equipamentos que se utilizam de laser terrestre em sua grande maioria se baseiam no método de tempo e retorno (CALDERS *et al.*, 2015). Consiste em mensurar o tempo gasto ao ser emitido o *laser*, o *laser* ter contato com a superfície a ser mensurada e retornar para o sensor (Fórmula 6). Com o dado de tempo mensurado é possível obter a métrica de distância entre o sensor e superfície mensurada além de ângulos (ALMEIDA, 2017; SCHILLING, 2014).

$$d = c * \frac{t}{2} \quad [6]$$

Em que:

t = tempo decorrido da emissão do feixe laser até seu retorno;

d = distância do sensor até a superfície mensurada; e

c = velocidade da luz ($3,00 \cdot 10^8$ km/s).

A varredura *laser* do LiDAR resultará em uma matriz, onde estarão contidas as observações, representada pelos pontos *laser* (ALMEIDA *et al.*, 2018). O conjunto de pontos *laser* forma uma matriz de pontos, que consiste nas nuvens de pontos tridimensionais, contendo as coordenadas (X, Y e Z) de cada ponto. As coordenadas são calculadas com base na distância do sensor e superfície mensurada como também o ângulo original (HENTZ, 2018; LIANG *et al.*, 2016).

A tecnologia *laser* vem sendo implementada desde os anos de 1960, em que os equipamentos eram utilizados na área meteorológica para os estudos da composição das nuvens, aerossóis, velocidade do vento e para dados batimétricos (GORGENS; SILVA, 2014). Já nas décadas de 1970 e 1980 surgiu a tecnologia de *Airbone Laser Profiling System*, um sistema de *laser* aéreo utilizado para levantamento de dados da superfície terrestre e oceanos (GIONGO *et al.*, 2010). Na década de 1990 foi desenvolvida a tecnologia de *Terrestrial Laser Scanner* (TLS), um equipamento LiDAR capaz de realizar varreduras laser junto com o georreferenciamento de GPS (RASCÃO, 2019).

A partir de 2010 com o surgimento da tecnologia de *Mobile Laser Scanner* (MDL) foi possível transportar o equipamento LiDAR em veículos e realizar a varredura *laser* de forma móvel, deixando de ser um equipamento estático, facilitando na questão da mobilidade do equipamento e contribuindo para aumento no número de varredura dentro da floresta (GOLLOB *et al.*, 2021; GOLLOB *et al.*, 2020; LIANG *et al.*, 2014). A tecnologia de MBL foi aprimorada em 2013, sendo desenvolvida o *Personal Laser Scanner* (PLS), podendo ser transportado nas costas ou na mão (BELAND *et al.*, 2019; LIANG *et al.*, 2016; RASCÃO, 2019). O PLS trouxe facilidades ao apresentar características de alta

mobilidade em diferentes tipos de terreno como também uma maior rapidez na coleta de dados (GOLLOB *et al.*, 2020; LIANG *et al.*, 2014).

Pesquisas na área florestal são relatadas a partir de 1996, em que foi estimado a altura e volume de árvores por meio de sistema de LiDAR aéreo (BAUWENS, SÉBASTIEN *et al.*, 2016; NILSSON, 1996). O pioneirismo dos trabalhos com LiDAR no setor florestal se dá principalmente na Europa, nos países da Noruega, Suécia e Finlândia (CARSON *et al.*, 2004).

Dentre os tipos de tecnologias de sensoriamento remoto que utilizam a radiação ativa, no qual se enquadra o LiDAR, podem ser citados o *laser* orbital, o *laser scanner* aéreo (ALS), *laser* de veículo aéreo não tripulado (UAV), TLS e o MLS (BELAND *et al.*, 2019; HENTZ, 2018). Para o TLS, o instrumento é fixo, geralmente apoiado em um tripé, é uma tecnologia que pode apresentar uma detalhada nuvem de pontos próxima ao solo, o que pode ser vantajoso no setor florestal para obter métricas acuradas de diâmetro, volume e biomassa de uma população arbórea (BELAND *et al.*, 2019)

Para analisar as oportunidades e limitações de cada tipo de LiDAR podem ser avaliadas três parâmetros relevantes, são eles: resolução espacial, oclusão e a cobertura (BELAND *et al.*, 2019). A resolução espacial irá se referir ao tamanho dos pontos gerados pelo *laser*, como também a distância entre os pontos (GIONGO *et al.*, 2010). A oclusão se refere ao bloqueio ou sombreamento da superfície mensurada, o que agrega erros às estimativas (BELAND *et al.*, 2019). Já a cobertura se refere a área que o equipamento pode realizar a varredura (BELAND *et al.*, 2019).

Os TLS, MLS e PLS são os que apresentam as maiores potencialidades de alcançar valores mais precisos para variáveis florestais, mas apresentando menores recobrimentos de área se comparado com o ALS (BELAND *et al.*, 2019; GIONGO *et al.*, 2010). Enquanto os ALS's usuais apresentam valores de 0,1-3,0 metros para os tamanhos de pontos e 0,2-2,0 metros de distância entre pontos, com o recobrimento de área de 10-1000 km² (BELAND *et al.*, 2019). O TLS e MDL apresentam um tamanho de ponto de 0,01-0,05 metros e uma distância entre pontos de 0,005-0,05 metros, com o recobrimento de área do TLS, chegando de 0,01-1,0 hectare e 0,25-5,0 hectares para o MLS (BELAND *et al.*, 2019).

Podem ser descritos dois tipos de varredura para os equipamentos de LiDAR terrestre, o modo de varredura simples e o modo de varredura múltipla (ASTRUP *et al.*, 2014). A varredura simples, que pode ser utilizada no caso do TLS, o equipamento é posicionado na região central de onde será nuvem de pontos, e será realizada a varredura, com uma coleta (ASTRUP *et al.*, 2014). Já no caso da varredura múltipla será feita uma série de coletas em diferentes posições do objeto escaneado, levando a uma sobreposição das nuvens de pontos, é um tipo de varredura que além de ser possível no TLS é adotado no MLS e PLS (ASTRUP *et al.*, 2014; FONSECA, 2018).

A vantagem ao ser utilizada a varredura simples, é a coleta de dados ser mais rápida, uma vez que será coletado apenas a varredura de um ponto de controle. Mas deve ser levado em consideração a maior taxa de oclusão, com a presença de copa e galhos das árvores, como também outros obstáculos que venham a ocorrer entre o sensor e a superfície mensurada (LOVELL *et al.*, 2011). Já no caso da varredura múltipla ocorrerá o total recobrimento das árvores mensuradas, será coletado pontos de diversas posições, podendo ser eliminado ou reduzir os problemas com oclusões e ruídos causados por obstáculos (FONSECA, 2018).

As vantagens ao ser utilizada a tecnologia LiDAR no setor florestal é a alta densidade amostral, capacidade de penetração em espaços reduzidos, sensibilidade a pequenas variações na superfície e a geração de um grande volume de informações em um curto período de tempo (LIANG *et al.*, 2016). No caso dos modelos de TLS, em determinadas coletas, pode gerar um volume de pontos excessivo, o que leva a buscar alternativas para reduzir as nuvens de pontos para extração de métricas, sem ocasionar problemas com a acurácia das estimativas (ALMEIDA, 2017).

As pesquisas com TLS e PLS já vêm sendo desenvolvidas para árvores individuais visando buscar maior precisão nas métricas obtidas (GOLLOB *et al.*, 2021; LIANG *et al.*, 2016). A obtenção das métricas pode ocorrer por meio de modelagem computacional ao escanear a árvore individualmente, ou o escaneamento a nível de parcela e posteriormente realizar a segmentação das árvores de interesse dentro da nuvem de pontos (LIANG *et al.*, 2016).

Dentre variáveis dendrométricas amplamente pesquisados para os diferentes tipos de LiDAR estão o DAP e HT, justamente por serem variáveis de grande interesse no desenvolvimento de pesquisas e projetos no cenário florestal (ALMEIDA, 2017; BIENERT *et al.*, 2006; FONSECA, 2018). Mas, deve ser levado em consideração que os trabalhos com LiDAR atualmente são desenvolvidos, em sua maioria, para áreas homogêneas, principalmente para espécies com alto valor comercial, como é o caso das diferentes variedades de eucalipto e pinus (FONSECA, 2018; GOLLOB *et al.*, 2021; STOVALL *et al.*, 2017).

Com relação a obtenção de DAP, a nível de indivíduo, por meio de LiDAR, pesquisas já vêm apresentando que é possível obter dados com exatidão e precisão (LICHTI *et al.*, 2006). Contudo problemas na obtenção de diâmetros vêm sendo apresentados ao trabalhar com árvores com multi-fuste, devido aos *softwares* e algoritmos não conseguirem diferenciar troncos e fustes das árvores, o que é comumente encontrado em árvores de floresta nativa (VAN-LEEUVEN; NIEUWENHUIS, 2010). Outro problema é relacionado ao adensamento dos plantios e florestas, já que influencia diretamente na identificação correta dos indivíduos na nuvem de pontos, comprometendo assim as métricas obtidas (DASSOT *et al.*, 2011; LIANG *et al.*, 2012). Os problemas podem chegar a ser contornados por meio de mais varreduras ou aumento da densidade da nuvem de pontos, o que é viável até o limite de poder computacional disponibilizado (HENTZ, 2018).

Assim como o DAP a altura das árvores já vêm sendo pesquisada, e são apresentados resultados consistentes, tanto para árvores individuais como também a nível de parcela (ALMEIDA, 2017; MENGESHA *et al.*, 2015). Contudo a partir de certas alturas as métricas podem apresentar resultados menos precisos, isso devido a presença de ruídos e oclusões em maiores alturas, agregando assim erros (LIANG *et al.*, 2016).

Cuidados devem ser tomados com o processamento de dados da nuvem de pontos, um deles está relacionado aos ruídos e oclusões (GARCÍA *et al.*, 2015). Os ruídos, que no setor florestal podem ser causados por obstruções de galhos, folhas, arbustos ou qualquer outro objeto que obstrua a trajetória do laser até a superfície mensurada (GARCÍA *et al.*, 2015; LEEUVEN, VAN;

NIEUWENHUIS, 2010). Os ruídos interferem, aumentando o erro nas estimativas, por meio do aumento da área sombreada (oclusões). Sendo assim necessário assim a eliminação dos mesmos por meio da sua identificação e limpeza da nuvem de pontos brutos por meio de algoritmos (ALMEIDA, 2017).

3.1.3 Pacotes e programas para processamento de dados LiDAR para florestas

Os dados obtidos por meio dos diversos tipos de equipamentos LiDAR, são nuvens de pontos 3D, contendo as coordenadas X, Y, Z de cada ponto gerado, após sua obtenção são necessários pré e pós-processamentos para obtenção das variáveis florestais. Para o suporte do processamento de dados são disponibilizados, tanto na forma gratuita ou paga, programas e pacotes que realizam a extração das variáveis, como são o caso do 3D Forest, Fusion, LIDAR360 e pacotes disponíveis no *software* R como o TreeLS e LiDR.

O programa 3D Forest (versão 0.51), possui uma versão gratuita para teste e sua versão oficial paga, e a partir da nuvem de pontos é capaz de realizar a segmentação automática de árvores, gerar modelo digital de terreno (MDT), capacidade de extrair métricas das árvores automaticamente, como DAP e HT (3D FOREST, 2022). O programa foi apresentado por Trochta *et al.*, (2017), em um povoamento florestal demonstrou os algoritmos utilizados gerou o MDT e extraiu as variáveis de DAP e HT da floresta. Outros trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos validando o programa, chegando a estimativas precisas e evidenciando que por meio do programa é possível chegar a resultados confiáveis (CALDERS *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2019; SCHNEIDER *et al.*, 2019).

Já o programa FUSION/LDV (versão 4.40), da mesma forma que o programa anterior é capaz de segmentar e extrair as variáveis de floresta a partir de uma nuvem de pontos obtidas por LiDAR, com a vantagem de ser um *software* totalmente livre (MCGAUGHEY, 2022). No trabalho de Favarin, (2019) utilizou uma série de pacotes ofertados pelo *software*, dentre alguns pacotes utilizou o *ThinData* (equaliza a densidade de pontos), *Catalog* (resumo da nuvem de pontos), *foundfilter* (filtra os retornos refletidos ao nível do solo),

GridSurfaceCreate (cria o MDT), *ClipData* (normalização da MDT), *canopymodel* (cria o modelo de altura de copa) e *TreeSeg* (segmenta as copas das árvores). Já o trabalho desenvolvido por Shiota, (2020) avaliou o número de árvores e altura total das árvores, em que como resultado encontrou uma variação de mais ou menos um metro para as alturas e obteve um número maior de árvores que real a partir dos processamentos das nuvens de pontos a partir do FUSION/LDV.

Por último o *software* LiDAR360 (versão 5.0), é um software pago, em que é possível realizar extração de métricas florestais, podendo realizar análises de árvores individuais e análises de regressão (GREENVALLEY, 2022). No trabalho de Ma *et al.*, 2022 utilizando *software* buscou segmentar e extrair a altura de árvores individuais através de uma nuvem de pontos de LiDAR, chegando ao RMSE de 1,175 metros e RMSE (%) de 12.54%. Já Ko *et al.*, 2021 extraiu DAP e altura total com o software, chegando ao RMSE de 1,22 cm e 1,48 m, respectivamente, em determinadas parcelas que estudou.

É possível também a utilização de pacotes para utilização de softwares, como é o caso dos pacotes *TreeLS* e *LiDR* que dão suporte para processamento de dados LiDAR no *software* R. Ambos os programas possuem funcionalidades para criação de MDT, normalização, segmentação de árvores, análises de árvore individual e extração de variáveis florestais, como é o caso do DAP e HT.

Peter *et al.*, (2021) utilizou o pacote LiDAR para processamento de 11 terabytes de nuvem de pontos, equivalentes a 22.900 km² de floresta, extraíndo variáveis dendrométricas dos povoamentos estudados. Já Gollob *et al.*, (2020), trabalhou com o pacote *LiDR* para processamento de nuvem de pontos adquiridos por PLS para análise de árvore individual para diferentes espécies. Para o pacote *TreeLS*, estudos já vêm demonstrando precisão satisfatória para variáveis de DAP e altura total de árvores (BOGDANOVICH *et al.*, 2021; MOREIRA *et al.*, 2021).

3.1.4 Custos para o inventário florestal por meio do sensoriamento remoto

Para o desenvolvimento de pesquisas e projetos florestais vêm se buscando ferramentas que contribuam para o planejamento e execução e monitoramento com qualidade e baixo custo (BUNGENSTAB, 2011; SILVA *et al.*, 2014). Por meio do sensoriamento remoto, podem ser empregadas potenciais metodologias das geotecnologias que apresentem meio exatos e precisos para a obtenção de dados, como é o caso das imagens de satélite, fotografias aéreas, sistemas de informações geográficas e sistema de posicionamento global por satélite (BUNGENSTAB, 2011).

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANT's), para obtenção de imagens aéreas, no cenário florestal já vem apresentando vantagens, muito relacionado ao custo operacional reduzido, agilidade, alta intensidade amostral e alto recobrimento de área (AASEN *et al.*, 2015; TANG; SHAO, 2015). Inventários de baixo custo com VANT's já são implementados visando o monitoramento de florestas, como no caso de controle de plantas e árvores invasoras (MÜLLEROVÁ *et al.*, 2017). Trabalhos como o de Navarro *et al.*, (2020) demonstram que a utilização de VANT's para estimativa de biomassa ocorre de forma precisa e com menor custo se comparado com as medições por meio do inventário tradicional.

Outro meio é o uso de LiDAR, contudo é uma tecnologia dependente de uma nuvem de pontos com uma densidade de pontos ideal, de acordo com o objetivo do projeto proposto. Desse modo, para alcançar essa nuvem de pontos ótima é necessário levar em consideração uma série de fatores como densidade da floresta e tamanho das árvores (KAARTINEN *et al.*, 2012). No caso de trabalhos com árvores individualizadas, existe a necessidade de maior precisão, que por sua vez exige um aumento da densidade das nuvens de pontos, tal fato elevam os custos de aquisição, processamento e armazenamento dos dados coletados (REX; KÄFER; DALLA CORTE, 2020).

Contudo uma alternativa com maior viabilidade para o uso de LiDAR é por meio de LiDAR acoplado em VANT's, em que apresenta dados precisos e com significativa redução de custos se comparado aos demais métodos e até mesmo inventários tradicionais em determinados casos (KAARTINEN *et al.*, 2012; YAN *et al.*, 2018). Jaakkola *et al.*, (2017) utilizou sensores de baixo custo

acoplados a drones para estimar alturas de um povoamento de *Pinus sylvestris*, chegando a resultados com erros inferiores a 20%.

Estudos relacionados aos custos e operacionalidade de equipamentos do sensoriamento remoto são de grande relevância, isso porque, muitos desses equipamentos possuem um alto valor aquisitivo, como no caso dos diferentes tipos de LIDAR, o que impacta diretamente no valor dos projetos de inventários usando a tecnologia. Deve ser levado em consideração também que o processamento dos dados adquiridos por meio desses equipamentos demanda um poder computacional alto, e por muitas vezes são muito complexos, exigindo assim tempo e competência para ser executado.

3.2 Estimação de altura e diâmetro em Inventários Florestais

Tradicionalmente as variáveis mensuradas em um inventário florestal são a altura total e o diâmetro à altura do peito das árvores (SANQUETTA *et al.*, 2009; SOARES *et al.*, 2011). Tais métricas para plantios homogêneos são amplamente divulgados no meio científico (CEZANA *et al.*, 2012; PINTO JÚNIOR; SILVEIRA, 2021; MIRANDA *et al.*, 2019; TONINI *et al.*, 2019). Principalmente empregados para plantios comerciais como é o caso das diversas espécies de eucaliptos e pinus, sendo utilizadas diferentes técnicas e tecnologias para desenvolvimento (PINTO JÚNIOR; SILVEIRA, 2021; TONINI *et al.*, 2019).

Já para plantios mistos e florestas nativas as pesquisas são mais escassas se comparado às monoculturas, isso devido à dificuldade de estabelecimento e estabilização dos plantios mistos (LE *et al.*, 2021; RUSSO *et al.*, 2020). Os plantios mistos são áreas de coexistência de duas ou mais espécies florestais, podendo ser elas nativas ou exóticas (PIOTTO, 2008; WEST, 2014).

Os fatores que diferenciam o desenvolvimento de árvores dentro de um plantio misto para uma monocultura estão ligados às condições climáticas, as espécies que as compõem e idade do plantio (RUSSO *et al.*, 2020). Plantios mistos são mais difíceis de estabilizar e manejar comparado às monoculturas (LE *et al.*, 2021). Fator relacionado a alta variedade de espécies e grupos

ecológicos, já que apresentam diferentes taxas de crescimento (DICKINSON *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2019).

As florestas tropicais, como é o caso da Amazônia apresentam, por muitas vezes, áreas muito extensas com difícil acesso, apresentando também alta variabilidade para as métricas de diâmetro e alturas obtidas com inventário (LAURO *et al.*, 2018; REX *et al.*, 2018). E deve ser levado em consideração que a alta variabilidade dos dados obtidos em campo influenciam diretamente no ajuste de modelos hipsométricos, volume, biomassa e carbono (FRUTUOSO *et al.*, 2020).

A altura e diâmetro são medidas base para outras estimativas, sendo assim necessário minimizar os erros gerados (MAYRINCK *et al.*, 2016). É possível a geração de dois tipos de erros, os erros amostrais e não amostrais (SILVA *et al.*, 2017). Enquanto os erros amostrais estão relacionados aos processos de amostragem, ou seja, utilizados para seleção das árvores a serem medidas, os erros de não-amostragem estão relacionados com as coletas em campo, equipamentos e processamentos a serem utilizados para mensurar as variáveis, sejam diretos ou indiretos (SANQUETTA *et al.*, 2009; SOARES *et al.*, 2011).

Levantada a importância de se obter os variáveis da floresta de forma acurada, é de suma importância estudar métodos e ferramentas de forma otimizadas para realizar as coletas dessa informação (CURTO *et al.*, 2019; LAURO *et al.*, 2018). Alguns variáveis devem ser levados em consideração para escolher um método para mensurar diâmetros e alturas, como é o caso de menor custo de aquisição, variabilidade da área da floresta, economia de tempo, eficiência do equipamento, experiência do mensurador e precisão das informações coletadas (CURTO, *et al.*, 2013; LARJAVAARA *et al.*, 2016).

3.2.1 Medição de diâmetro para espécies nativas

Um importante parâmetro básico para os inventários florestais é o diâmetro à altura do peito (DAP). O DAP é padronizado ao medir o (s) diâmetro (s) da árvore a uma altura a 1,30 metros (FINGER, 2006). A padronização a 1,30 metros ocorre por ser considerada a altura adequada para retirada das

medidas, contribuindo para otimização das coletas em campo, torna as coletas mais ergonômicas e diminui os riscos de erros ao coletar informações próximas a base do fuste (DURIGAN; GARRIDO, 1992).

Podem ser elencados os motivos do DAP ser uma medida relevante a ser medida. A princípio o DAP é a medida que pode ser facilmente medida e avaliada em campo se comparada a métricas como altura total, chegando a valores mais confiáveis, ou seja, que agregam menos erros para os resultados (SOARES *et al.*, 2011). O DAP também é considerado a base para uma série de variáveis calculadas, como é o caso da área seccional à altura do peito (Fórmula 1), sendo uma medida importante para os cálculos de volume de madeira (SOARES *et al.*, 2011).

$$g = \frac{\pi \cdot \text{DAP}^2}{4} \quad [1]$$

Em que:

g = área seccional à altura do peito (m^2); e

DAP = diâmetro à altura do peito (1,30 metros) em metros.

Dentre outras funções relevantes para o uso do diâmetro, pode ser citado a validação das frequências da ocorrência das árvores por meio de classes diamétricas (SILVA; NETO, 1979). Por último, através do DAP é possível gerar informações da área basal do povoamento, que ocorre pelo somatório das áreas seccionais das árvores medidas em campo, métrica essa que comumente é dada por hectare (SILVA; NETO, 1979).

Contudo haverá situações que não será possível coletar o DAP na altura padronizada, isso porque haverá situações diversas em campo, que prejudicam as coletas, dentre alguns dos problemas que possam surgir, são a ocorrência de árvores inclinadas, árvores situadas em aclive, árvores bifurcadas ou com deformação na região de 1,30 metros (FINGER, 2006). Para evitar erros na coleta de dados é necessário que ocorra o planejamento adequado do inventário, contudo é impossível estar precavido para todas as eventualidades que possam surgir, devendo assim, o mensurador tomar decisões em campo

para contornar os problemas que venham a surgir (SANQUETTA, C. R. *et al.*, 2009).

Nos Inventários Florestais são utilizados comumente métodos diretos para medição de DAP de árvores, isso devido a facilidade de se coletar a medida. Pode ser coletado o DAP diretamente por meio de suta, fita diamétrica, vara de Biltmore, visor de diâmetro de Bitterlich e dentre outros equipamentos. Pode ser coletado também a circunferência, por meio de fita métrica comum, e posteriormente realizar a conversão para diâmetro (Fórmula 2) (MACHADO; FIGUEIREDO, 2009).

$$d = \frac{C}{\pi} \quad [2]$$

Em que:

d = diâmetro; e

C = circunferência.

Dentre os instrumentos mais utilizados no Brasil para mensurar DAP, são utilizados a suta e fita métrica, contudo para a utilização desses equipamentos deve-se tomar cuidados (SANQUETTA, C. R. *et al.*, 2009). Para suta, alguns problemas que podem ser citados são: o equipamento deve estar no eixo horizontal em relação a superfície da árvore, caso contrário irá superestimar as medições, o que acarreta em erros de medição; o equipamento deve estar devidamente ajustado para evitar imprecisões; em caso de árvores grandes haveria a necessidade de usar sutas grandes, o que seria difícil de manusear e transportar; e o acúmulo de sujeira na barra graduada, que dificulta o deslizamento do braço móvel (MACHADO; FIGUEIREDO, 2009). Já para a fita diamétrica, deve haver o mesmo cuidado com o eixo horizontal da árvore que a suta; ao longo do uso das fitas podem apresentar desgastes e expansão das mesmas, o que leva na alteração da graduação das fitas, sendo necessário assim a substituição; e árvores de grande porte é necessário a assistência de mais pessoas para circundar a árvore (SOARES *et al.*, 2011).

O método de coleta de DAP por método indireto é utilizado quando as medições apresentam alguma restrição ou se encontram inacessíveis para

serem mensuradas por métodos diretos (MACHADO; FIGUEIREDO, 2009). Equipamentos comumente utilizados para a medição indireta são os Pentaprisma de Wheeler e o Criterion 4000 (NICOLETTI *et al*, 2015).

3.2.2 Medição de altura para espécies nativas

A altura total da árvore consiste na distância linear entre dois pontos extremos da árvore, sendo o primeiro ponto ao nível do solo e o segundo ponto o ápice da árvore (SANQUETTA, C. R. *et al.*, 2009). A métrica de altura possui forte contribuição para o manejo florestal, em análises da estrutura vertical da floresta, monitoramento dos incrementos em altura e no uso de índices de sítio (ANDRADE *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2012). Dentre os métodos para obtenção das alturas das árvores pode ocorrer de maneira direta, sendo realizadas as medições diretamente sobre a árvore, ou indireta, utilizando princípios geométricos e trigonométricos (SANQUETTA *et al.*, 2009; FRUTUOSO *et al.*, 2020).

Segundo Machado & Figueiredo Filho, 2009 são possíveis medir as seguintes alturas das árvores:

- Altura Total: Referente a distância do nível do solo até o ápice da árvore, considerando seu eixo principal. É uma medida de difícil obtenção para florestas nativas, devido ao tempo e custos demandados para realizar a sua obtenção.
- Altura do Fuste: É a altura referente ao nível do solo até a base da formação da copa.
- Altura Comercial: Compreende a altura do nível do solo até um diâmetro definido ou um diâmetro definido de acordo com a venda da madeira. É considerada uma medida subjetiva pois depende do objetivo a que será dado a madeira.
- Altura de Copa: Compreende na distância entre a base que se inicia a formação da copa até o topo da copa.
- Altura de Toco: Consiste na distância entre o nível do solo até o ponto em que será realizado o abate da árvore. A altura em si depende da finalidade em que será destinado a madeira, como também, presença de danos

ou formas que pode ser apresentado pela árvore, sendo necessário alterar a altura padrão.

Contudo, mesmo sendo uma medida importante para projetos florestais, não é uma medição que pode ser considerada fácil, podendo ser por vezes demorada e onerosa para ser realizada (CURTO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2012). A maior dificuldade para obter estimativas indiretas está associado a distância entre o mensurador e as árvores, isso porque os equipamentos usuais para medir altura são baseados em princípios trigonométricos, o que requer uma distância definida entre mensurador e árvore, o princípio se baseia na relação de ângulos e distâncias entre mensurador e objeto mensurado (CURTO, *et al.*, 2013; LAURO *et al.*, 2018). Comumente ocorre que a visada para a base ou tronco da árvore está obstruída, em outros casos, pode ocorrer que o mensurador esteja muito próximo da árvore com copas de maiores diâmetros, o que também dificulta na visada do topo da árvore e acaba gerando erros (SCOLFORO; THIERSCH, 2004).

Segundo Soares *et al.*, 2011, é possível a ocorrência de três tipos de problemas ao mensurar altura de árvores:

- Erros relacionados a objetos: Em situações ideais para mensurar a altura de árvores, o mensurador deve ter boa visibilidade da base e topo das árvores. Contudo pode haver situações em que a visada está obstruída por obstáculos, como a presença de regeneração, arbustos, cipós e outros obstáculos. Uma segunda situação ocorre com a árvore estando inclinadas.

- Erros relacionados aos instrumentos: Hipsômetros baseados no princípio geométrico devem ter um cuidado com relação a escala de graduação, devido a tendenciosidade que o equipamento possa apresentar. Já os hipsômetros baseados no princípio trigonométrico podem apresentar erros ao ser manuseados de forma inadequada, como também, realizar manutenção inadequada dos equipamentos.

- Erros relacionados ao observador: A princípio, o mensurador deve possuir habilidade no manuseio dos equipamentos. Dentre os erros relacionados ao mensurador podem ser abordados: problemas de visada das árvores; manuseio inadequado do equipamento; uso de metodologia errada

para uso do equipamento; e distância errada entre mensurador e árvore quando exigido pelo equipamento.

Os trabalhos que utilizam as métricas de altura descrevem os equipamentos utilizados, mas dificilmente descrevem as metodologias adotadas ou os vieses alcançados com o trabalho (LARJAVAARA; MULLER-LANDAU, 2013). Deve ser ressaltada a importância de se realizar a validação das técnicas de estimação de altura, principalmente para redução de custo da operação, como também de tempo demandado para a realização da operação (LAURO *et al.*, 2018; FRUTUOSO, *et al.*, 2020).

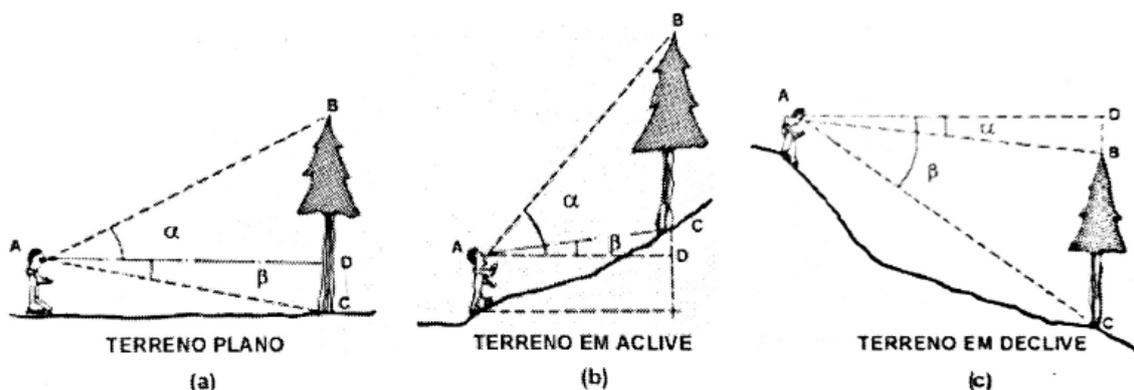
As alturas das árvores podem ser obtidas pelos métodos diretos, indiretos e estimativas (SILVA; NETO, 1979). Pelo método de medida direta pode ser realizado por meio da árvore em pé ou após sua derrubada. Para as árvores derrubadas comumente é realizada a medição por meio de trenas, podendo ser utilizado varas ou réguas para seccionamento das toras (MACHADO; FIGUEIREDO, 2009). No caso da medição direta de árvores em pé pode ser utilizada varas ou hastes graduadas, que ao se aproximar das árvores pode ser retirada as suas medidas, contudo é uma técnica inviável para árvores de grande porte, devido a vara dificilmente ter a proporcionalidade do tamanho da árvore (CEZANA *et al.*, 2012).

O método indireto consiste que o mensurador não possua contato direto com a árvore, devendo estar a uma determinada distância da árvore (SILVA & NETO, 1979). Dentro das ferramentas difundidas para método indireto estão os altímetros e os clinômetros (MACHADO, S. A.; FILHO, 2009). Dentre os tipos de equipamentos utilizados podem ser abordados os hipsômetros trigonométricos e os geométricos (SANQUETTA *et al.*, 2009; FRUTUOSO, DE *et al.*, 2020).

Os hipsômetros trigonométricos se baseiam em relações angulares de triângulos retângulos (SOARES *et al.*, 2011). Se baseiam no mensurador estar a uma distância fixa da árvore e possuir visada da base e do topo da árvore (SILVA *et al.*, 2012). A visada da base e topo proporcionam dois ângulos α e β (Figura 1), considerando uma linha imaginária horizontal do olho do mensurador até a árvore formando um ângulo reto (MACHADO; FIGUEIREDO, 2009). Por meio dos ângulos gerados e princípio trigonométrico é possível

chegar a equações matemáticas para estimar alturas para área planas (Fórmula 3) (Figura 1a), em aclive (Fórmula 4) (Figura 1b) e declive (Fórmula 5) (Figura 1c) (MACHADO; FIGUEIREDO, 2009).

Figura 1 - Representação de coleta de dados com equipamentos trigonométricos.



Fonte: MACHADO; FILHO, 2009.

$$h=L(\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\beta) \quad [3]$$

$$h=L(\operatorname{tg}\alpha-\operatorname{tg}\beta) \quad [4]$$

$$h=L(\operatorname{tg}\beta-\operatorname{tg}\alpha) \quad [5]$$

Já os hipsômetros geométricos se utilizam dos princípios dos triângulos semelhantes (FINGER, 2006). Diferente dos hipsômetros trigonométricos, necessitam que o mensurador esteja a uma determinada distância da árvore, em que a maioria dos equipamentos necessitam do valor da distância horizontal entre mensurador e árvore (SOARES *et al.*, 2011). A medida necessita de uma maior acuracidade visual devido o mensurador precisar ter contato visual da base e topo da árvore ao mesmo tempo (MACHADO; FIGUEIREDO, 2009).

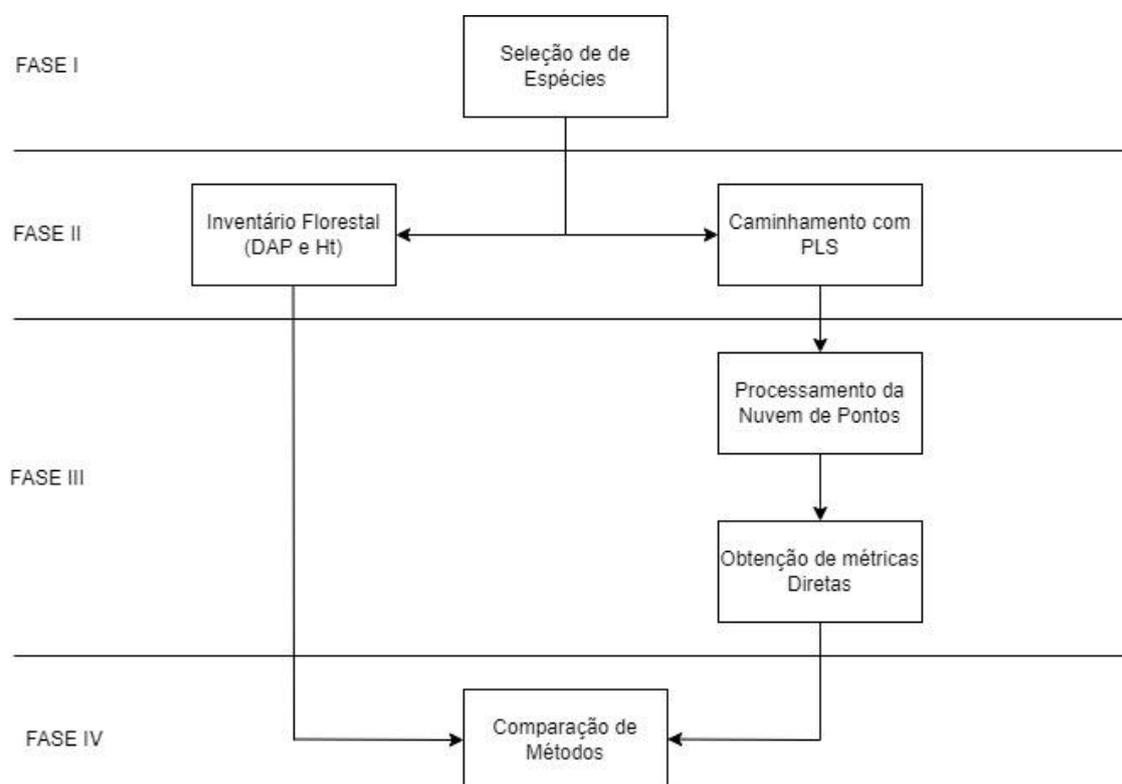
Já os métodos de estimação ocorrem por estimativas oculares ou por relações hipsométricas. O método ocular ocorre por meio de uma pessoa devidamente treinada, sendo que determinados estudos comprovam a acurácia das medidas obtidas por tal método (FINGER, 2006). Já os métodos hipsométricos se utilizam de outras variáveis da árvore para alcançar as métricas de altura das árvores, como é o caso do DAP (SILVA *et al.*, 2012;

SILVA *et al.*, 2012). A utilização de relações hipsométricas é utilizada principalmente para florestas de grande porte como também florestas nativas, devido à dificuldade de se obter métricas de altura (MARTINS *et al.*, 2016; FRUTUOSO *et al.*, 2020).

4 METODOLOGIA

No sentido de auxiliar o leitor na compreensão da metodologia empregada, a seguir é apresentado um breve resumo que permite formar uma ideia geral dos procedimentos utilizados. Considerando os objetivos inicialmente propostos, a metodologia consistiu basicamente em selecionar um conjunto de árvores pertencentes a diferentes espécies em um povoamento misto. Uma vez selecionadas, estas árvores tiveram seus diâmetros e suas alturas totais medidos com fita métrica e régua telescópica, respectivamente. No caso de árvores com altura total superior a sete metros, foi empregado o hipsômetro vertéx. Em seguida, estas mesmas árvores foram escaneadas por meio de um sensor PLS de modo que as medidas obtidas de forma tradicional fossem comparadas com as mesmas medidas por meio do PLS. Ao final, procurou-se comparar a eficiência e eficácia dos diferentes paradigmas empregados para se medir o diâmetro e altura de árvores. A figura 2 sintetiza o resumo da metodologia empregada descrita anteriormente.

Figura 2 - Fluxograma descritivo das fases para o processamento e análise de dados

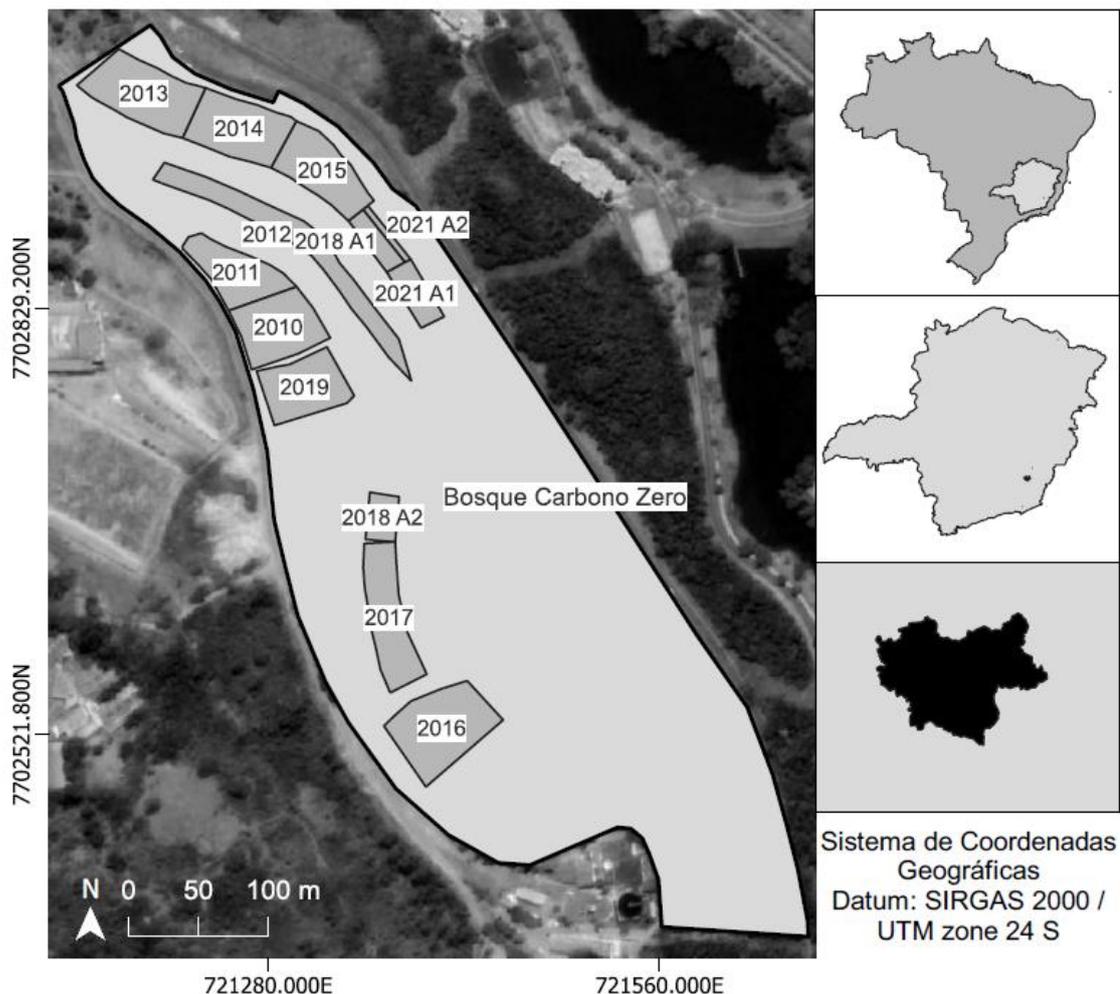


4.1 Descrição da Área

Os plantios do Programa Carbono Zero começaram a ser implantados anualmente em dezembro, desde o ano de 2010. O objetivo central dos plantios é realizar a neutralização das emissões de Gases do Efeito Estufa da Semana do Fazendeiro, um evento anual de extensão que ocorre na Universidade Federal de Viçosa (UFV). O Bosque Carbono Zero conta com 11 plantios realizados do ano de 2010 ao ano de 2021, perfazendo um total de 4955 indivíduos plantados de 69 espécies diferentes.

A área de estudo (Figura 3) está localizada no Espaço de Eventos da UFV em Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20° 25' 35,73" S, 42°52'30,84" O). A altitude é de 708 m com ocorrência no bioma da Mata Atlântica, a vegetação regional classificada como Estacional Semidecidual Montana (IBGE, 2012). O clima é classificado como Cwa (Köppen) com invernos frios e secos e verões quentes e chuvosos. A precipitação anual média é de 1229,0 mm com temperatura média anual de 20,6 °C (MARTINS *et al.*, 2018).

Figura 3 - Mapa descritivo do Bosque Carbono Zero, e as respectivos plantios identificados pelo ano de realização dos plantios



A topografia da região apresenta gradiente pedogeomorfológico com topos planos, latossolos distrófico e abundantes em alumínio, com acesso a rampas coluviais com latossolos rasos e câmbicos e fundos de grotas com predomínio de Cambissolos eutróficos abundantes em nutrientes (AMARAL *et al.*, 2004).

4.2 FASE I: Inventário piloto e seleção de espécies

Os inventários ocorrem anualmente no Bosque Carbono Zero. Foram coletados dados de Diâmetro à Altura do Solo (DAS em mm), por meio de paquímetro digital de precisão até o diâmetro de 20 mm e acima é utilizado fita métrica. A altura total (HT) em cm foi obtida utilizando vara graduada até 7 metros e acima mensuradas por meio do Vertex Laser 5 (Tabela 1). As informações de nomes científicos e seus respectivos grupos ecológicos foram

definidas por meio de Lorenzi, 2000 e Barbosa et al., 2017. Foram selecionadas as espécies com um número mínimo de 10 indivíduos para avaliação das alturas e diâmetros.

Foram realizados dois inventários para as coletas de informações. O primeiro inventário foi realizado no período de julho a outubro de 2020, sendo os dados coletados e utilizados para selecionar as espécies a serem utilizadas na pesquisa.

Tabela 1 - Tabela contendo as espécies, número de indivíduos, alturas e diâmetros das espécies previamente selecionadas.

Nome Vulgar	Nome Científico	Número de indivíduos	Média de DAS (cm)	Desvio Padrão DAS (cm)	Média de Altura (cm)	Desvio Padrão Altura (cm)
Albizia	<i>Albizia hassleri</i> (Chodat) Burr.	66	11,40	4,52	464,50	130,65
Angelim	<i>Andira anthelmia</i> (Vell.) Benth.	23	10,70	4,04	288,57	125,99
Angico Vermelho	<i>Anadenanthera macrocarpa</i> (Benth.) Brenan	208	15,85	8,55	695,01	341,86
Angico-branco	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	7	6,58	1,40	538,57	98,90
Araçá	<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	11	8,17	2,98	171,64	79,51
Araribá	<i>Centrolobium tomentosum</i> Guill. ex Benth.	17	13,79	7,56	725,12	166,07
Arichichá	<i>Sterculia chicha</i> St. Hil. ex Turpin	12	13,30	5,80	682,50	345,18
Aroeira	<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	156	12,85	7,89	449,51	198,01
Aroeira-salsa	<i>Schinus molle</i> L.	32	8,27	4,17	313,78	102,29
Bico-de-pato	<i>Machaerlum nyctitans</i> (Vell.) Benth.	16	15,97	6,09	730,31	238,08
Carne-de-vaca	<i>Clethra scabra</i> Pers	13	7,17	1,60	515,08	105,04
Carrapateiro	<i>Metrodorea nigra</i> A.St.-Hil.	31	21,49	4,73	1031,61	272,74
Cassia Rosea	<i>Cassia grandis</i> L. F.	42	11,97	6,65	611,40	263,38
Castanha Mineira	<i>Bombacopsis glabra</i> (Pasq.) A. Rab.	122	12,54	2,51	371,70	154,14
Cedro	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	27	11,73	3,14	285,21	158,46
Copaiba	<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	10	6,91	1,53	564,50	112,85
Cutieira	<i>Joannesia princeps</i> Vell.	146	15,23	7,43	594,50	296,98
Farinha Seca	<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneb	31	17,01	6,56	718,39	229,79
Faveiro	<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	259	13,79	6,27	580,54	259,74
Fedegoso	<i>Senna macranthera</i> (Collad.) Irwin et Barn.	12	17,20	6,27	632,08	226,77
Guapuruvu	<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake	80	19,48	6,66	948,38	368,16

Nome Vulgar	Nome Científico	Número de indivíduos	Média de DAS (cm)	Desvio Padrão DAS (cm)	Média de Altura (cm)	Desvio Padrão Altura (cm)
Guarabu	<i>Barnebydendron riedelii</i> (Tul.) J.H.Kirkbr.	14	7,13	1,76	376,57	113,06
Ingá-branco	<i>Inga laurina</i> (S.W.) Wild	36	23,53	6,34	676,39	140,51
Ingá-de-metro	<i>Inga edulis</i> Martius	26	10,49	3,14	624,04	237,74
Ingá-miúdo	<i>Inga vera</i> Willd.	68	18,58	6,01	632,59	195,77
Ipê-mulato	<i>Tabebuia umbellata</i> (Sond.) Sand.	60	7,21	2,12	424,45	131,56
Ipê-preto	<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	19	10,49	3,60	481,58	234,27
Ipê-roxo	<i>Tabebuia impetiginosa</i> (Mart.) Standl.	14	7,06	1,89	389,93	114,85
Ipê-verde	<i>Cybistax antisiphilitica</i> (Mart.) Mart.	34	9,59	6,02	404,62	225,56
Jacarandá caviúna	<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.)	47	11,11	5,37	554,38	280,01
Jacarandá Mimoso	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	22	10,18	2,81	416,54	163,74
Jacaré	<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J. F.	50	19,55	6,65	907,10	225,41
Jambolão	<i>Syzygium cumini</i> L.	13	19,65	10,17	619,23	161,77
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	64	10,47	4,51	598,72	219,49
Jenipapo	<i>Genipa americana</i> L.	14	8,76	2,96	379,68	225,37
Leiteiro	<i>Sapium glandulatum</i> (Vell.) Pax	15	8,21	2,07	430,67	73,82
Orelha-de-negro	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	71	15,28	5,77	605,08	199,09
Paineira	<i>Ceiba speciosa</i> (A. St.-Hil.) Ravenna	49	16,18	10,95	507,67	362,41
Pau d'alho	<i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms	17	10,20	2,48	571,47	187,18
Pau-Ferro	<i>Caesalpinia ferrea</i> Mart. ex Tul. var. <i>leiostachya</i> Benth.	21	8,94	5,24	373,57	135,39
Pau-vidro	<i>Pterocarpus violaceus</i> Vogel	12	6,71	1,46	395,00	127,39
Pau-viola	<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	68	8,17	2,90	354,09	178,45

Nome Vulgar	Nome Científico	Número de indivíduos	Média de DAS (cm)	Desvio Padrão DAS (cm)	Média de Altura (cm)	Desvio Padrão Altura (cm)
Quaresmeira	<i>Tibouchina granulosa</i> Cogn.	59	8,93	4,17	273,64	201,99
Saboneteira	<i>Sapindus saponaria</i> L.	15	8,41	2,34	473,33	161,86
Sapucaia	<i>Lecythis pisonis</i> Camb.	32	11,44	3,77	538,81	240,35
Sibipiruna	<i>Caesalpinia pluviosa</i> DC.	18	11,26	4,91	492,61	222,22
Sobrasil	<i>Colubrina glandulosa</i> Perk.	27	14,25	6,35	767,41	254,55
Tataré	<i>Pithecolobium tortum</i> Mart.	13	10,72	2,81	422,69	32,25
Urucum	<i>Bixa orellana</i> L.	35	11,51	1,97	326,29	60,20
Vinhático	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	43	26,93	10,89	985,49	356,67

Os indivíduos com diâmetro inferior a 5 cm de DAS não foram utilizados para a seleção de espécies devido a pouca representatividade que possam trazer à pesquisa. Foi realizada uma pré-seleção com o cálculo do valor de cobertura das espécies do Bosque Carbono Zero, realizando cálculo de densidade (Equação 6) e dominância (Equação 9) para cada espécie, chegando a seu respectivo Valor de Cobertura (VC) (Equação 12).

Com base do cálculo de VC (Tabela 3), foram selecionadas 12 espécies com base em seis critérios, sendo eles: Espécies com maiores e menores DAS, espécies com maiores e menores HT, espécies com maior formação de copa e tortuosidade.

$$DA_{ijk} = n_{ijk} \cdot f_{jk} \quad [6]$$

$$DTA = \sum_{i=1}^S \sum_{k=1}^K DA_{ik} \quad [7]$$

$$DR_i = \frac{DA_i}{DTA} \cdot 100 \quad [8]$$

$$DoA_{ijk} = G_{ijk} \cdot f_{ik} \quad [9]$$

$$DoT = \sum_{i=1}^S \sum_{k=1}^K DoA_{ik} \quad [10]$$

$$DoR_i = \frac{DoA_i}{DoT} \cdot 10 \quad [11]$$

$$VC_i = DR_i + DoR_i \quad [12]$$

Em que,

DA_{ijk} = número de árvores por hectare ou densidade absoluta da i-ésima espécie na j-ésima parcela do k-ésimo nível de inclusão;

n_{ijk} = número de árvores amostradas da i-ésima espécie na j-ésima parcela do k-ésimo nível de inclusão;

$f_{jk} = 10.000 / a_{jk}$ = fator de conversão por hectare para a j-ésima parcela do k-ésimo nível de inclusão;

DTA = Densidade Total Absoluta;

DR_i = Densidade Relativa da i-ésima espécie;

DoA_{ijk} = área basal por hectare ou dominância absoluta da i-ésima espécie na j-ésima parcela do k-ésimo nível de inclusão;

G_{ijk} = Área basal das árvores amostradas da i-ésima espécie na j-ésima parcela do k-ésimo nível de inclusão;

DoT = Dominância Total;

DoR_i = Dominância Relativa da i-ésima espécie;

VC_i = Valor de Importância da i-ésima espécie.

Tabela 2 - Tabela contendo os valores de Densidade, Densidade relativa, Dominância, Dominância Relativa e Valor de Cobertura para cada espécie pré-selecionada.

Nome Vulgar	Nome Científico	DA	DR	DoA	DoR	VC
Angico-vermelho	<i>Anadenanthera macrocarpa</i> (Benth.) Brenan	1497	9.44	29.95	12.82	11.13
Faveiro	<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	1505	9.49	26.613	11.39	10.44
Aroeira	<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	898	5.67	13.852	5.93	5.8
Cutieira	<i>Joannesia princeps</i> Vell.	704	4.44	15.054	6.44	5.44
Vinhatico	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	240	1.52	15.351	6.57	4.04
Castanha-mineira	<i>Bombacopsis glabra</i> (Pasq.) A. Rab.	627	3.95	8.0591	3.45	3.7
Inga-branco	<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake	269	1.7	12.488	5.35	3.52
Orelha-de-negro	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	461	2.91	9.2754	3.97	3.44
Carrapateiro	<i>Metrodorea nigra</i> A.St.-Hil.	277	1.75	9.8026	4.2	2.97
Paineira	<i>Ceiba speciosa</i> (A. St.-Hil.) Ravenna	278	1.76	6.9536	2.98	2.37
Jatoba	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	448	2.83	3.0773	1.32	2.07
Albizia	<i>Albizia hassleri</i> (Chodat) Burr.	376	2.37	3.8715	1.66	2.02
Quaresma-roxa	<i>Tibouchina granulosa</i> Cogn.	429	2.71	2.5787	1.1	1.91
Inga-de-metro	<i>Barnebydendron riedelii</i> (Tul.) J.H.Kirkbr.	434	2.74	2.2111	0.95	1.84
Inga-miudo	<i>Inga vera</i> Willd.	176	1.11	5.0643	2.17	1.64
Jacaranda-craviuna	<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.)	336	2.12	2.3534	1.01	1.56
Farinha-seca	<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneb	187	1.18	4.5274	1.94	1.56
Saboneteira	<i>Sapindus saponaria</i> L.	428	2.7	0.7036	0.3	1.5
Urucum	<i>Bixa orellana</i> L.	230	1.45	2.4595	1.05	1.25
Cassia-rosea	<i>Cassia grandis</i> L. F.	198	1.25	2.825	1.21	1.23
Pau-ferro	<i>Pterocarpus violaceus</i> Vogel	286	1.81	1.1042	0.47	1.14

Nome Vulgar	Nome Científico	DA	DR	DoA	DoR	VC
Aroeira-salsa	<i>Schinus molle</i> L.	272	1.72	1.1842	0.51	1.11
Sobrasil	<i>Colubrina glandulosa</i> Perk.	162	1.02	2.5672	1.1	1.06
Angelim	<i>Andira anthelmia</i> (Vell.) Benth.	184	1.16	1.504	0.64	0.9
Angico-branco	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	217	1.37	1.0137	0.43	0.9
Sapucaia	<i>Lecythis pisonis</i> Camb.	158	1	1.4704	0.63	0.81
Ipe-mulato	<i>Tabebuia umbellata</i> (Sond.) Sand.	186	1.17	0.829	0.35	0.76
Ipe-preto	<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	152	0.96	1.2328	0.53	0.74
Cedro	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	128	0.81	1.5172	0.65	0.73
Jambolao	<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J. F.	71	0.45	2.3006	0.98	0.72
Fedegoso	<i>Senna macranthera</i> (Collad.) Irwin et Barn.	87	0.55	2.0666	0.88	0.72
Jenipapo	<i>Genipa americana</i> L.	193	1.22	0.462	0.2	0.71
Ipe-verde	<i>Cybistax antisyphilitica</i> (Mart.) Mart.	157	0.99	0.5827	0.25	0.62
Araca	<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	171	1.08	0.2331	0.1	0.59
Copaiba	<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	164	1.03	0.2934	0.13	0.58
Ipe-roxo	<i>Tabebuia impetiginosa</i> (Mart.) Standl.	151	0.95	0.3123	0.13	0.54
Jacaranda-mimoso	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	108	0.68	0.8261	0.35	0.52
Bico-de-pato	<i>Machaerlum nyctitans</i> (Vell.) Benth.	59	0.37	1.3421	0.57	0.47
Carne-de-vaca	<i>Clethra scabra</i> Pers	121	0.76	0.4042	0.17	0.47
Arariba	<i>Centrolobium tomentosum</i> Guill. ex Benth.	63	0.4	1.2014	0.51	0.45
Leiteiro	<i>Sapium glandulatum</i> (Vell.) Pax	105	0.66	0.5635	0.24	0.45
Sibipiruna	<i>Caesalpinia pluviosa</i> DC.	77	0.48	0.8784	0.38	0.43

Nome Vulgar	Nome Científico	DA	DR	DoA	DoR	VC
Pau-vidro	<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	112	0.71	0.2827	0.12	0.41
Arichicha	<i>Sterculia chicha</i> St. Hil. ex Turpin	55	0.34	0.9243	0.4	0.37
Pau-alho	<i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms	72	0.46	0.6045	0.26	0.36
Tatare	<i>Pithecolobium tortum</i> Mart.	55	0.35	0.4963	0.21	0.28
Pau-brasil	<i>Caesalpinia ferrea</i> Mart. ex Tul. var. <i>leiostachya</i> Benth.	37	0.23	0.0412	0.02	0.13
Jambo-rosa	<i>Syzygium cumini</i> L.	5	0.03	0.0124	0.01	0.02

As espécies para os dois últimos critérios foram selecionadas de forma visual (Tabela 3), avaliados segundo critérios descritos previamente (Tabela 4 e 5). Para cada espécie selecionada, foram considerados 10 centros de classes de DAS, sendo mensurada uma árvore por centro de classe, totalizando 120 árvores medidas.

Tabela 3 - Avaliação qualitativa das espécies para os índices de tortuosidade (Tort.) e distribuição da copa ao longo do fuste.

Espécie	Tort.	Copa
<i>Albizia hassleri</i> (Chodat) Burr.	2	3
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	2	3
<i>Anadenanthera macrocarpa</i> (Benth.) Brenan	3	3
<i>Andira anthelmia</i> (Vell.) Benth.	2	2
<i>Barnebydendron riedelii</i> (Tul.) J.H.Kirkbr.	2	3
<i>Bixa orellana</i> L.	2	4
<i>Bombacopsis glabra</i> (Pasq.) A. Rab.	5	2
<i>Caesalpinia ferrea</i> Mart. ex Tul. var. <i>leiostachya</i> Benth.	2	4
<i>Caesalpinia pluviosa</i> DC.	2	5
<i>Cassia grandis</i> L. F.	2	3
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	2	2
<i>Ceiba speciosa</i> (A. St.-Hil.) Ravenna	2	4
<i>Centrolobium tomentosum</i> Guill. ex Benth.	2	3
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	3	2
<i>Clethra scabra</i> Pers	2	3
<i>Colubrina glandulosa</i> Perk.	2	3
<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	3	3
<i>Cybistax antisyphilitica</i> (Mart.) Mart.	3	3
<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.)	3	3
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	2	4
<i>Gallesia integrifolia</i> (Spreng.) Harms	4	4
<i>Genipa americana</i> L.	2	2
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	5	3
<i>Inga edulis</i> Martius	3	4
<i>Inga laurina</i> (S.W.) Wild	3	5
<i>Inga vera</i> Willd.	3	3
<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	2	3
<i>Joannesia princeps</i> Vell.	2	5
<i>Lecythis pisonis</i> Camb.	2	3
<i>Machaerlum nyctitans</i> (Vell.) Benth.	2	3
<i>Metrodorea nigra</i> A.St.-Hil.	2	4
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	3	3

Espécie	Tort.	Copa
<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J. F.	3	4
<i>Pithecolobium tortum</i> Mart.	2	3
<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	2	5
<i>Psídiu catllelanu</i> Sabine	4	2
<i>Pterocarpus violaceus</i> Vogel	2	3
<i>Sapindus saponaria</i> L.	3	3
<i>Sapium glandulatum</i> (Vell.) Pax	2	3
<i>Schinus molle</i> L.	5	4
<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	5	3
<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake	2	2
<i>Senna macranthera</i> (Collad.) Irwin et Barn.	4	4
<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneb	3	3
<i>Sterculia chicha</i> St. Hil. ex Turpin	2	2
<i>Syzygium cumini</i> L.	2	5
<i>Tabebuia impetiginosa</i> (Mart.) Standl.	3	3
<i>Tabebuia umbellata</i> (Sond.) Sand.	2	3
<i>Tibouchina granulosa</i> Cogn.	2	3
<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	2	3

Tabela 4 – Critérios de avaliação para tortuosidade.

Tortuosidade	Nota de Avaliação
Muito pouco	1
Pouco	2
Médio	3
Tortuoso	4
Muito tortuoso	5

Tabela 5 – Critério de avaliação de recobrimento de copa ao longo do fuste

Recobrimento de Fuste	Nota de Avaliação
< 20% de recobrimento de fuste	1
Entre 20% e 40 % de recobrimento de fuste	2
Entre 40% e 60 % de recobrimento de fuste	3
Entre 60% e 80 % de recobrimento de fuste	4
> 80% de recobrimento de fuste	5

4.3 FASE II: DAP e HT coletados por método convencional e PLS

4.3.1 DAP e Ht obtidos por inventário tradicional

O segundo inventário ocorreu em fevereiro de 2022 para as espécies e indivíduos selecionados para as espécies e centro de classe selecionados, de forma a coincidir com as coletas de PLS no mesmo período. Foram coletados dados de Diâmetro à Altura do Peito (DAP em cm), utilizando fita métrica e a altura total (HT), em cm, foi obtida utilizando vara graduada até 7 metros e acima mensuradas por meio do Vertex Laser 5.

4.3.2 FASE II: DAP e HT obtidos por meio de Personal Laser Scanner (PLS)

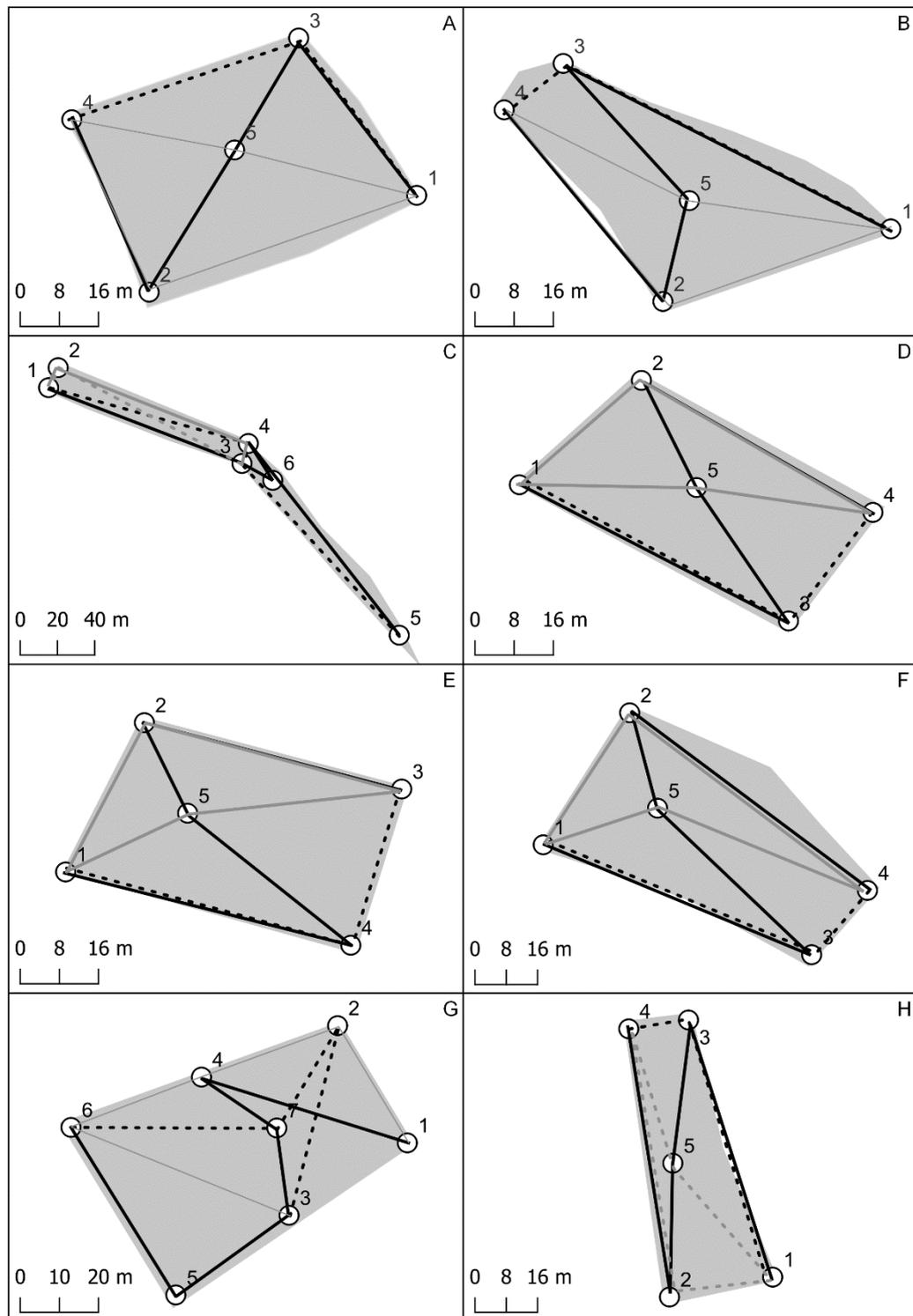
Para a varredura com PLS na área foi utilizado o *laser scanner* ZEB Horizon, modelo GS_510254. Como características apresenta: Leitura de 300.000 pontos por segundos, precisão de 1 a 3 cm e alcance de 100 metros de distância. Possuindo um campo de visão angular de 360° x 270°.

A coleta de dados começou com a inicialização do equipamento no ponto de controle, sobre uma área nivelada, identificado como 1 (Figura 4) em todas as 8 áreas caminhadas. O tempo de inicialização do equipamento é de 15 segundos. Após a inicialização foi realizado o caminhamento, a pé, dentro das áreas de estudo, sendo que os dados foram armazenados dentro do disco do equipamento temporariamente, até total deslocamento da área. Após deslocamento o equipamento foi novamente montado sobre a área nivelada, onde foi feita a transferência dos dados para um dispositivo externo portátil.

Dentre os plantios estudados, apenas o referente a 2012 e 2016 não seguiram os mesmos padrões de caminhamento dos demais. Isso porque apresentam padrões e áreas maiores diferentes dos demais plantios.

Figura 4 - Figura ilustrando o caminhamento nas áreas escaneadas. Em todas as áreas iniciou-se no ponto de controle 1, seguindo a ordem das linhas: preto contínuo, preto tracejado, cinza contínuo, cinza tracejado (quando houver). Figura A = Plantio ocorrido em 2010, Figura B = Plantio ocorrido em 2011, Figura C = Plantio ocorrido em 2012, Figura D = Plantio ocorrido em 2013,

Figura E = Plantio ocorrido em 2014, Figura F = Plantio ocorrido em 2015,
 Figura G = Plantio ocorrido em 2016, Figura H = Plantio ocorrido em 2017.



4.4 FASE III: Processamento de dados LiDAR

O processamento e análise da nuvem de pontos ocorreu seguindo os procedimentos descritos na Figura 5.

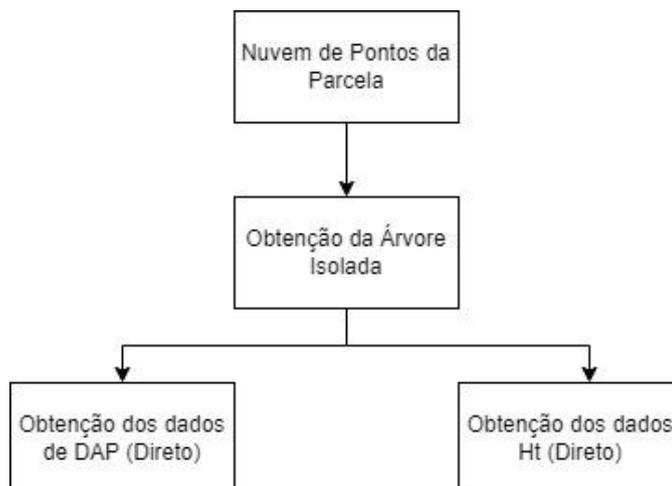


Figura 5 – Fluxograma descritivo das fases para o processamento de dados de PLS.

4.4.1 Obtenção da árvore isolada

Para descarregamento da nuvem de pontos obtida com a varredura na área, foi utilizado o GeoSLAM Hub *software* (ver. 5.3.1). A nuvem de pontos por meio do GeoSLAM Hub foram reduzida para 20%, dadas as limitações computacionais, os tamanhos das nuvens de pontos e tempo de caminhada (Tabela 6).

Tabela 6 - Tabela descritiva da nuvem de pontos, área e tempo de pontos geradas pelo caminhada com PLS para os respectivos plantios.

Plantio	Número de Pontos	Área do Plantio (m ²)	Tempo de Caminhamento (minutos)
2010	19.833.699	1592	12:04
2011	17.767.587	964	10:57
2012	26.482.273	2148	18:19
2013	22.228.890	2004	14:47
2014	22.921.960	2712	16:21
2015	16.540.027	1880	13:34
2016	24.481.574	2800	23:27
2017	24.137.862	2256	21:57

Para o planejamento inicial foi proposta a coleta de dados de 12 espécies em 10 áreas de plantios de idades diferentes. Contudo, em campo foi avaliado que os plantios mais jovens, de 1 ano e 2 anos, estavam sujos e com muita presença de braquiária (*Urochola decumbens*). Sendo assim uma espécie que estava selecionada para ser coletada dentro das áreas foi descartada.

A nuvem de pontos utilizada para o processamento dos dados LiDAR foi reduzida a 20%, isso devido ao poder computacional exigido para o processamento de dados com a nuvem à 100%. Estudos como o de Cunha Neto *et al.*, (2021) demonstram que mesmo as nuvens de pontos estando reduzidas apresentam resultados satisfatório para extração de métricas florestais, demonstrando também que densidades de pontos muito altas podem aumentar erros.

Ao buscar a localização de certas árvores, em suas respectivas posições dentro da nuvem de pontos, foi verificada situações que inviabilizaram o isolamento das mesmas. Estudos visando a detecção das árvores dentro de parcelas, no caso das nuvens de pontos, vêm sendo considerados como centro de pesquisas, devido ser uma etapa fundamental para a extração de métricas florestais, contudo, problemas com relação à detecção são encontradas e são comumente relacionadas ao sombreamento e competição com outras árvores e arbustos do entorno (LIANG *et al.*, 2012; LIANG; HYYPPA, 2013; OLOFSSON; HOLMGREN; OLSSON, 2014).

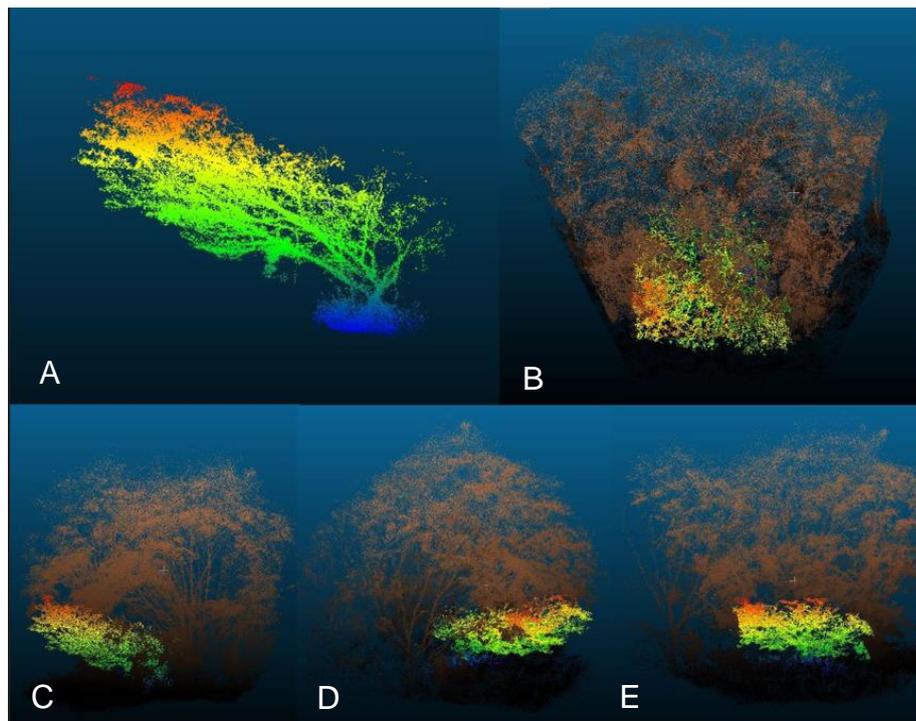
Para localização das árvores dentro da nuvem de pontos foram utilizadas as coordenadas de linha e posição da planta dentro dos plantios, essa localização proporcionou um suporte essencial para detecção das árvores. Deve ser ressaltada a importância de realizar o georreferenciamento da nuvem de pontos de forma precisa, ou possuir um meio de localização as árvores, pois assim diminui consideravelmente os esforços de trabalho e processamento (ALON, 2020; RIBAS, 2011).

Foi testado o modelo de segmentação automática das árvores por meio dos pacotes, TreeLS e LiDR, utilizados no *software* R para o isolamento das árvores. Mas o modelo de detecção foi descartado devido aos erros acarretados da não identificação do número de árvores correto e de forma coerente, optando-se assim pela individualização manual das árvores. É

relevante destacar que em pesquisas em nível de parcela é comum não detectar o número total de árvores, dado os problemas causados por copas entrelaçadas e dominadas (VAN-LEEUEWEN; NIEUWENHUIS, 2010). Maltamo *et al.* (2014) coloca que uma forma para facilitar a detecção em condições de florestas densas é a limpeza do entorno do tronco e scanner para eliminação de ruídos, pois pode agregar em erros para a detecção de troncos.

Dentre algumas situações que traziam problemas para isolamento das árvores pode ser abordada a supressão sofrida por árvores de maior porte em árvores de menor porte (Figura 6). Isso dentro da nuvem de pontos dificultava distinguir quais eram as copas e fustes de cada indivíduo arbóreo. No trabalho apresentado por Liang & Hyypä (2013), algumas de suas parcelas apresentaram alta densidade de árvores, sendo muitas juvenis, o que influenciou na detecção das árvores e obtenção de dados de diâmetro à 1,30 metros, sendo considerado como grande fonte de erros para as métricas de diâmetro.

Figura 5 - Figura ilustrativa de nuvem de pontos de indivíduo de arbóreo de *I. vera* suprimido por árvores em seu entorno. A- Nuvem de pontos de árvore isolada; B – Vista superior da nuvem de pontos; C – Vista da lateral esquerda nuvem de pontos; D - Vista da lateral direita da nuvem de pontos; e E - Vista frontal da nuvem de pontos.



Fonte: Autor

A limpeza também pode ser um processo realizado por meio de processos automatizados, contudo devido a irregularidade de tronco de algumas espécies optou-se por realizar de forma manual. Procedimentos de filtragem manual, para eliminação de *outliers* também foram apresentados por outros trabalhos, como também para eliminação de solo, galhos, folhas e dentre outras fatores que viessem a interferir na obtenção de métricas florestais (FONSECA, 2018; HENTZ, 2018; VASCONCELLOS, 2020).

4.4.2 Processamento e obtenção dos dados de DAP e HT

Uma vez gerada a nuvem de pontos foi utilizado o *software* Cloud Compare (ver. 2.12 beta), para realizar o isolamento das árvores dentro da nuvem de pontos. No próprio *software* existem ferramentas de recorte onde é possível recortar os pontos de interesse para o processamento. Já a obtenção das métricas de DAP e HT foram obtidas por meio dos pacotes TreeLS e LiDR, desenvolvidos para processamento de dados LiDAR no *software* de linguagem R.

4.5 FASE IV: Análises Comparativas

Após obter as estimativas de DAP e HT por PLS, será calculado o RMSE (*root mean square error*) (Equação 13 e 14) e viés (Equação 15 e 16) para validação dos modelos desenvolvidos. O RMSE é uma estatística amplamente utilizada para validar a acurácia de resultados obtidos por modelos, enquanto o viés e precisão combinados definem a performance de um estimador.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad [13]$$

$$\text{RMSE (\%)} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}} \cdot 100 \quad [14]$$

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{obs}} - y_{\text{est}})}{n} \quad [15]$$

$$\bar{e}_{\%} = \frac{\bar{e}}{\bar{Y}_{\text{obs}}} \cdot 100 \quad [16]$$

Em que:

\bar{x} = média do valor observado da variável de estudo

\bar{y} = média do valor observado da variável predita

\bar{e} = o viés

$\bar{e}_{\%}$ = o viés em porcentagem

y_{obs} = a biomassa observada

y_{est} = a biomassa estimada

\bar{Y}_{obs} = a média da biomassa observada

n = o número de árvores

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Obtenção dos dados de parcela e árvores isoladas

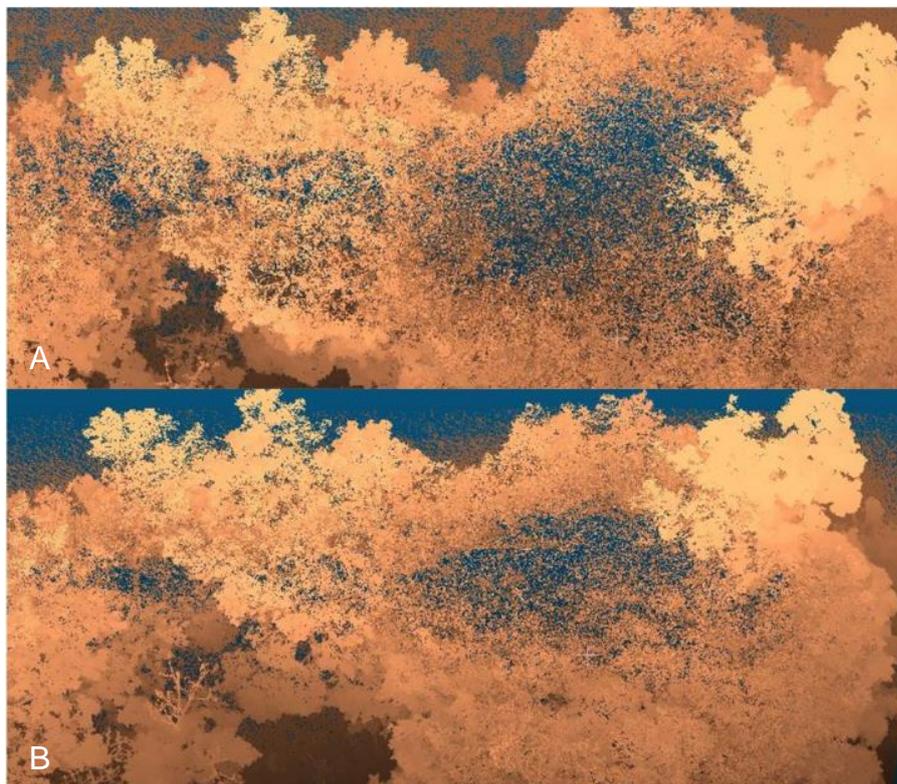
Dentre os 120 indivíduos propostos de 12 espécies distintas, foram isoladas ao todo 92 árvores de 11 espécies diferentes das nuvens de pontos originais. (Tabela 7).

Tabela 7 - Tabela descritiva das espécies selecionadas e suas respectivas famílias.

Espécies	Espécie	Família
Castanha-mineira	<i>Bombacopsis glabra</i> (Pasq.) A. Rab.	Bombacaceae
Cedro	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Meliaceae
Cutieira	<i>Joannesia princeps</i> Vell.	Euphorbiaceae
Guapuruvu	<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake	Fabaceae
Ingá-branco	<i>Inga laurina</i> (Sw.) Willd.	Bignoniaceae
Ingá-de-metro	<i>Inga edulis</i> Martius	Fabaceae
Ingá-miúdo	<i>Inga vera</i> Willd.	Fabaceae
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Fabaceae
Paineira	<i>Ceiba speciosa</i> (A. St.-Hil.) Ravenna	Bombacaceae
Quaresmeira	<i>Tibouchina granulosa</i> Cogn.	Melastomataceae
Vinhático	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	Fabaceae

Situações em que as nuvens de pontos das árvores estavam completamente deterioradas vieram a ocorrer (Figura 7). Tal fato pode ter ocorrido levando em consideração as árvores com maior diâmetro de copa na proximidade das árvores a serem mensuradas. Levando em consideração que a presença de copas maiores obstrui significativamente o trajeto dos *lasers* emitidos pelo equipamento, o que leva a oclusões. Clark *et al.* (2014) pondera em sua pesquisa que o TLS não é capaz de penetrar profundamente em ambientes adensados, com presença de arbustos e com dossel fechado, trazendo riscos de superestimar ou subestimar dados que possivelmente podem ser extraídos. Os diferentes tipos de copas e suas irregularidades em áreas de restauração, são um fator que influencia diretamente nos variáveis de detecção posteriormente (AYREY *et al.*, 2017).

Figura 6 - Figura ilustrando nuvem de pontos deteriorada por árvores competindo no entorno. A – Imagem transversal da nuvem de pontos; e B – Imagem diagonal da nuvem de pontos.



Fonte: Autor

Uma vez as árvores isoladas, foi possível obter os dados de diâmetro médio e altura total coletados e comparar os métodos de inventário tradicional (Tabela 8) com os dados obtidos com PLS (Tabela 9). Em uma análise prévia dos dados é possível verificar uma tendência de superestimação dos dados de diâmetros médios, enquanto o oposto é visualizado pelos dados de altura total. A causa da subestimação e superestimação dos dados de LiDAR, por muitas vezes, está associada a presença de ruídos e sombreamentos causando oclusões nas nuvens de pontos, sendo oriundos de copas entrelaçadas, as próprias copas das árvores mensuradas, arbustos, ou qualquer outro objeto que possa obstruir o trajeto do *laser* (GARCÍA *et al.*, 2015; LIANG *et al.*, 2016).

Foi observado um número inferior de fustes gerados pelo processamento se comparado com a árvore em campo. Problema ocorrido com árvores de grande número de fustes, cinco fustes e acima, que de modo geral foram as

espécies de *I. laurina* e *I. edulis*. A causa da subestimação do número de fuste das árvores foi relacionada a presença de ruídos e a supressão de fustes por fustes da própria árvore (KOCH et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2014a; OLIVEIRA et al., 2014b). Fator esse que pode ser relacionado a superestimação dos diâmetros apresentados no próximo tópico.

Tabela 8 - Tabela contendo estatísticas básicas do diâmetro médio (g) das espécies estudadas, Inventário Florestal Tradicional (IFT) e coletados em campo.

Espécies	Contagem	IFT			PLS		
		Média	Variância	Desvio Padrão	Média	Variância	Desvio Padrão
Geral	92	16,1512	65,8567	6,9878	30,4690	267,7918	15,3581
<i>B. glabra</i>	7	6,5254	1,4192	1,1913	22,7999	356,8034	18,8892
<i>C. fissilis</i>	7	8,7581	8,3112	2,8829	20,1659	245,0191	15,6531
<i>J. princeps</i>	8	17,1768	85,2707	9,2342	28,5873	186,7787	13,6667
<i>S. parahyba</i>	8	25,2698	115,7214	10,7574	26,3536	107,9756	10,3911
<i>I. laurina</i>	10	19,4001	85,6959	9,2572	30,8750	163,0521	12,7692
<i>I. edulis</i>	10	8,5948	9,1621	3,0269	30,1972	167,9606	12,9600
<i>I. vera</i>	10	10,1626	13,7656	3,7102	29,9503	177,7330	13,3317
<i>H. courbaril</i>	8	10,1266	19,7676	4,4461	30,6844	807,0949	28,4094
<i>C. speciosa</i>	8	26,8574	219,5734	14,8180	23,4335	168,7772	12,9914
<i>T. granulosa</i>	6	13,3157	40,0996	6,3324	52,5080	511,9387	22,6261
<i>P. reticulata</i>	10	31,4762	125,6371	11,2088	39,6041	52,5765	7,2510

Tabela 9 - Tabela contendo estatísticas básicas da altura total (HT) das espécies estudadas, para Inventário Florestal Tradicional (IFT) e coletados com PLS.

Espécies	Contagem	IFT			PLS		
		Média	Variância	Desvio Padrão	Média	Variância	Desvio Padrão
Geral	92	8,0140	7,2970	2,4990	7,7076	5,6189	2,2427
<i>B. glabra</i>	7	6,1710	2,0220	1,4220	6,1018	3,4124	1,8473
<i>C. fissilis</i>	7	4,4140	5,0780	2,2530	4,5598	4,8094	2,1930
<i>J. princeps</i>	8	8,6750	8,0960	2,8450	8,4884	6,6993	2,5883
<i>S. parahyba</i>	8	14,7750	23,1910	4,8160	13,6592	15,3137	3,9133
<i>I. laurina</i>	10	6,7100	4,6030	2,1460	6,4826	2,4621	1,5691
<i>I. edulis</i>	10	5,9600	4,2760	2,0680	5,9194	3,7046	1,9247
<i>I. vera</i>	10	6,5200	3,0530	1,7470	6,1205	2,8368	1,6843
<i>H. courbaril</i>	8	7,1250	2,6080	1,6150	6,5875	1,8927	1,3758
<i>C. speciosa</i>	8	9,6130	11,0610	3,3260	9,7487	10,4891	3,2387
<i>T. granulosa</i>	6	6,6500	2,2750	1,5080	6,6901	2,3673	1,5386
<i>P. reticulata</i>	10	11,5400	14,0070	3,7430	10,4259	7,8200	2,7964

5.2 Análise dos dados de diâmetro à altura do peito por meio do PLS

Ao analisar os dados de espécies de modo geral o RMSE (%) alcançou um valor de 38,17 %, enquanto o seu Viés (%) chegou a valores de 266,13 % (Tabela 10), o que pode ser considerado valores muito altos. Trabalhos como de Almeida, 2017 demonstraram que houve superestimação dos dados de DAP para espécies de *Pinus elliotii* var. *elliotii* e um RMSE (%) de 14,1%. Silva, 2011 ao trabalhar com *Pinus spp.* também obteve valores superestimados de diâmetros e áreas seccionais trabalhando com *laser scanner* terrestre (TLS).

Tabela 10 - Tabela contendo as espécies, e análises estatísticas (RMSE e Viés) para dados de DAP.

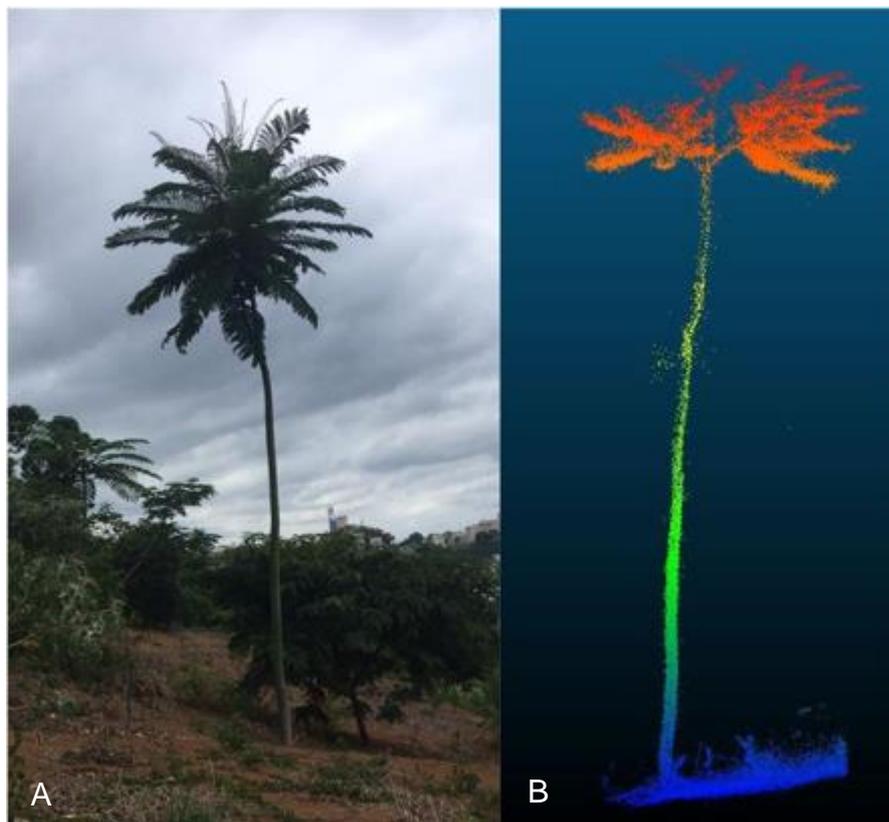
Espécies	RMSE	RMSE(%)	Viés	Viés (%)
Geral	6,9249	38,4313	47,9538	266,1321
<i>B. glabra</i>	3,1540	40,9911	9,9474	129,2838
<i>C. fissilis</i>	2,2644	24,9869	5,1277	56,5815
<i>J. princeps</i>	2,7887	17,7885	7,7770	49,6071
<i>S. parahyba</i>	3,0944	13,1351	9,5752	40,6451
<i>I. laurina</i>	9,2621	37,9059	85,7859	351,0871
<i>I. edulis</i>	3,0301	34,5687	9,1818	104,7481
<i>I. vera</i>	10,3074	66,3901	106,2432	684,3118
<i>H. courbaril</i>	3,6874	37,9237	13,5969	139,8399
<i>C. speciosa</i>	5,3645	22,8924	28,7776	122,8058
<i>T. granulosa</i>	13,7395	62,2571	188,7743	855,3826
<i>P. reticulata</i>	8,2683	24,2028	68,3654	200,1167

A grande maioria das pesquisas para estimativas de diâmetros de árvores com *laser* terrestre vêm sendo desenvolvidas para povoamentos florestais homogêneos, espécies florestais com características de fuste único e com poucas irregularidades, como são os eucaliptos e pinus, poucas pesquisas são voltadas para plantios com maior variabilidade de espécies (ASTRUP *et al.*, 2014; CALDERS *et al.*, 2015; GARCÍA *et al.*, 2015; STOVALL *et al.*, 2017; XU, *et al.*, 2021).

Dentre as espécies estudadas o *S. parahyba* (Figura 8) chegou aos menores valores de RMSE (%) e Viés (%). O *S. parahyba* apresenta taxa de crescimento muito rápido, chegando a um volume de madeira de 600 m³ em um período de 10 anos, e mesmo as árvores apresentando idades distintas no mesmo povoamento,

apresentam os mesmos padrões de crescimento, com tronco cilíndrico e retilíneo (LATORRACA *et al.*, 2015; LIMA, *et al.*, 2000; NISGOSKI *et al.*, 2012). A espécie apresenta condições de crescimento semelhantes a espécies com importância comercial, como no caso do eucalipto, com taxa de crescimento rápido, copa alta e tronco cilíndrico e retilíneo (MÜLLER *et al.*, 2021). As melhores estatísticas que o *S. parahyba* chegou podem estar associadas à semelhança de crescimento com as espécies comerciais, em que os pacotes são comumente utilizados e testados.

Figura 7 - Figura ilustrando indivíduo de *S. parahyba*. A – Árvore medida em campo; e B – Árvores extraídas na nuvem de pontos.

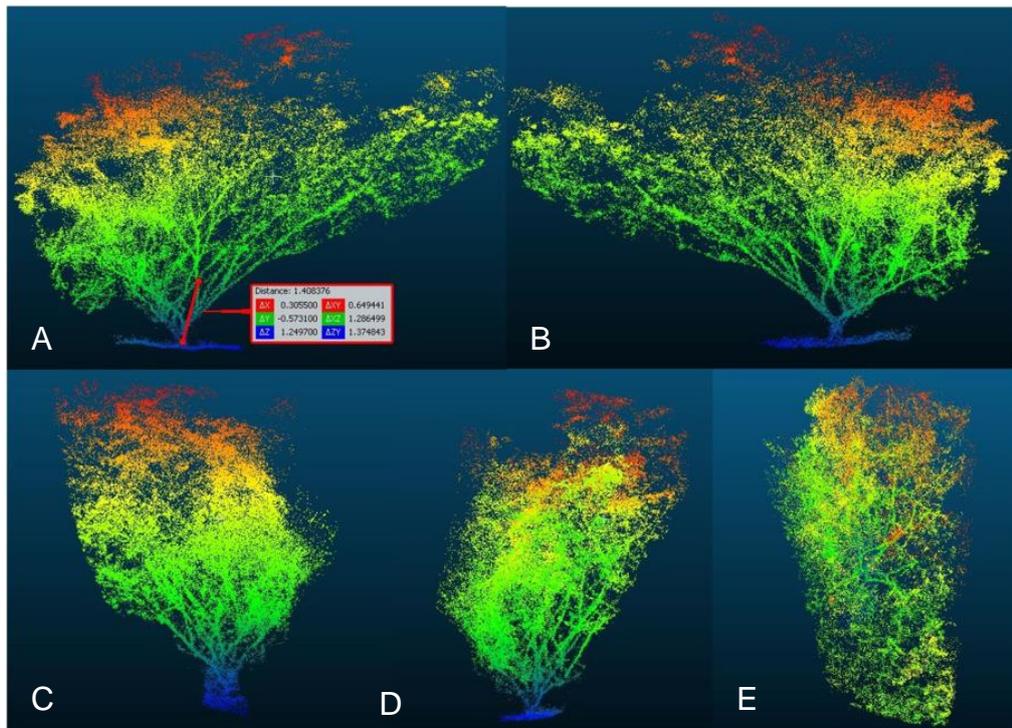


Fonte: Autor

Já o oposto pode ser observado para a espécie de *I. vera* (Figura 9), que apresentaram os maiores valores de RMSE (%) e Viés (%). Como características o gênero *Inga spp.* possui crescimento irregular com presença de bifurcações, que podem surgir desde a base do tronco, apresentando também taxa de brotações em casos de cortes ou quebras que vierem a ocorrer no tronco e galhos (EMBRAPA, 2006). Almeida, (2017) coloca que a área de pinus que estudou com TLS,

apresentou alta densidade de fustes, e isso pode ter influenciado diretamente no ajuste dos diâmetros.

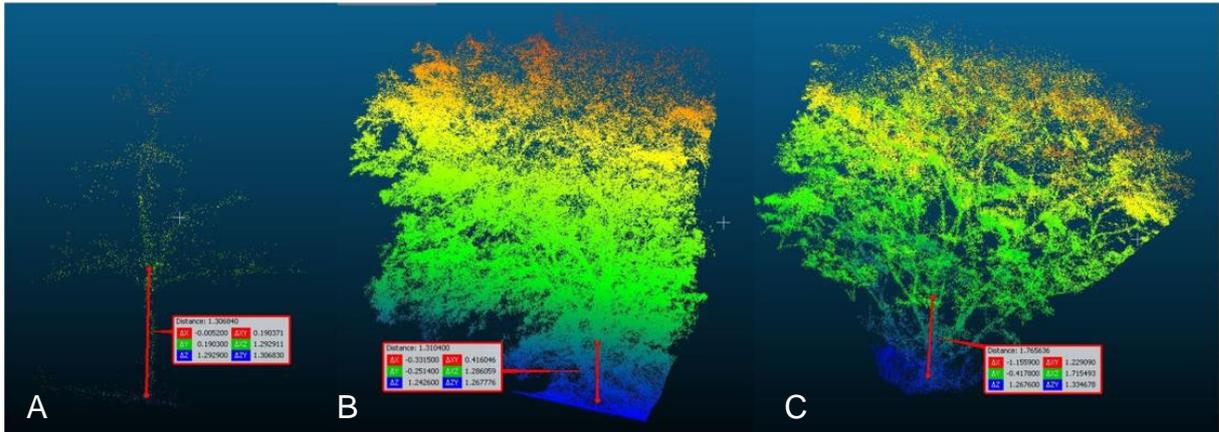
Figura 8 - Figura ilustrativa de nuvem de pontos de indivíduo de arbóreo de *I. vera* suprimido por árvores em seu entorno. A - Nuvem de pontos de árvore isolada, com demarcação do estimada do DAP; B – Vista lateral esquerda da nuvem de pontos; C – Vista frontal nuvem de pontos; D - Vista traseira da nuvem de pontos; e E – Vista superior da nuvem de pontos.



Fonte: Autor

Espécies como a *T. granulosa*, *B. glabra*, *I. edulis* e *I. laurina* apresentam características de formação de galhos e copa à altura de 1,30 metros (Figura 10). Tais características criam obstáculos para o alcance do *laser* até a região a ser mensurada, acarretando em oclusões e sombreamento (ALMEIDA, 2017; GARCÍA *et al.*, 2015). Henning & Radtke (2006) ao realizar varredura com LiDAR Terrestre, obtiveram resultados de diâmetros superestimados pela presença de galhos e copas de árvores na região de 1,30 metros.

Figura 9 - Figura ilustrativa de nuvem de pontos de indivíduo de arbóreo com DAP demarcados aproximadamente. A – nuvem de pontos de árvore de *B. glabra*; B – nuvem de pontos de árvore de *I. laurina*; C – nuvem de pontos de árvore de *I. vera*.



Fonte: Autor

Ao observar o gráfico de dispersão (Figura 11 e 12), é possível visualizar a tendência de erros para superestimação dos dados, com um erro máximo de 28 centímetros, ocorrida em um indivíduo de *I. vera*. A presença de ruídos entre os fustes das mesmas árvores, pode estar relacionada a presença de galhos e folhas próximas as regiões a ser mensurada, o que pode contribuir significativamente para a superestimação dos diâmetros (LOVELL *et al.*, 2011). Uma preocupação relevante é a desobstrução de qualquer obstáculo na região a 1,30 antes de ser mensurada, contudo essa preocupação é mais complexa no caso de medições a nível de parcela e com um maior número de indivíduos a ser mensurada.

Figura 10 - Gráfico de dados estimados (obtidos por meio do PLS), por dados observados (obtidos por inventário tradicional).

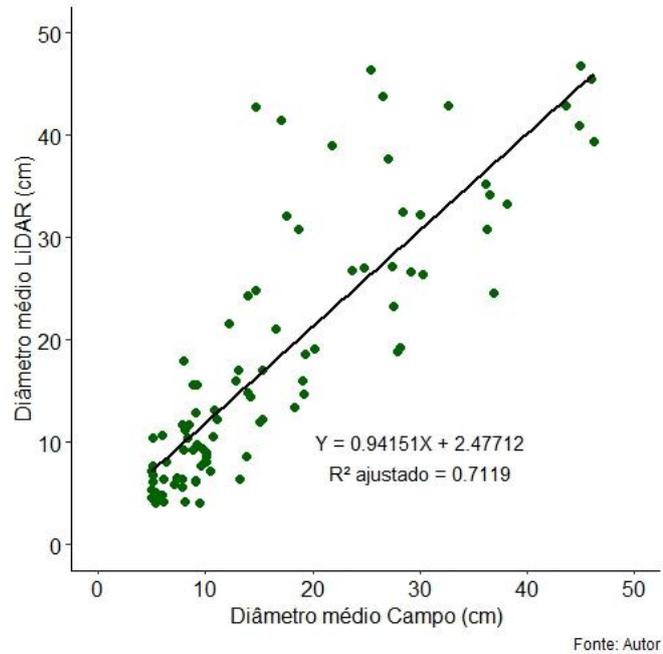
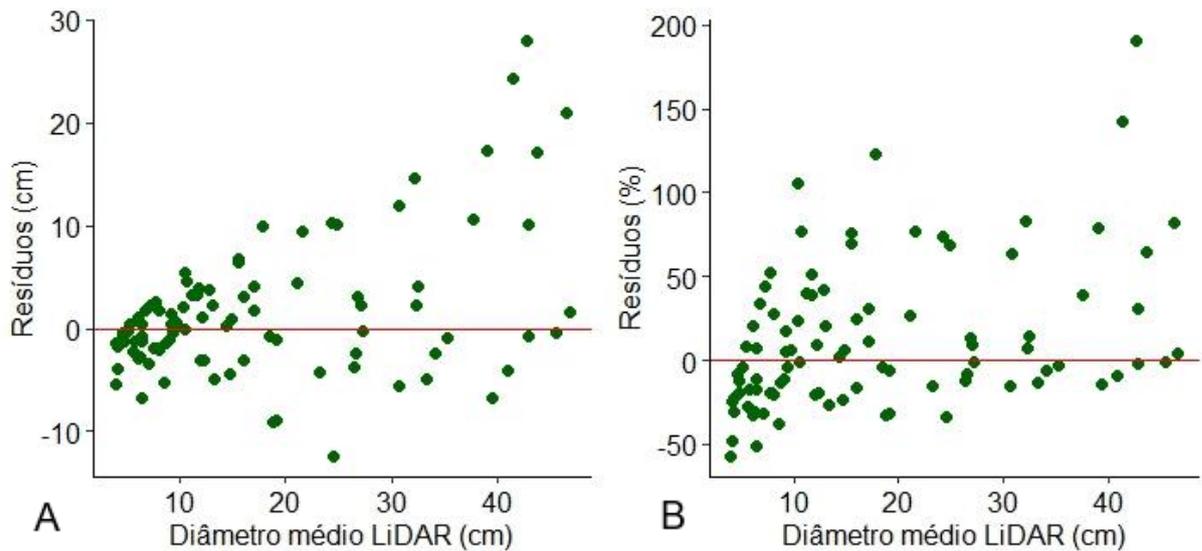


Figura 11 - Gráfico de resíduos para dados de diâmetro médio em centímetros (A) e gráfico de resíduos em porcentagem (B).

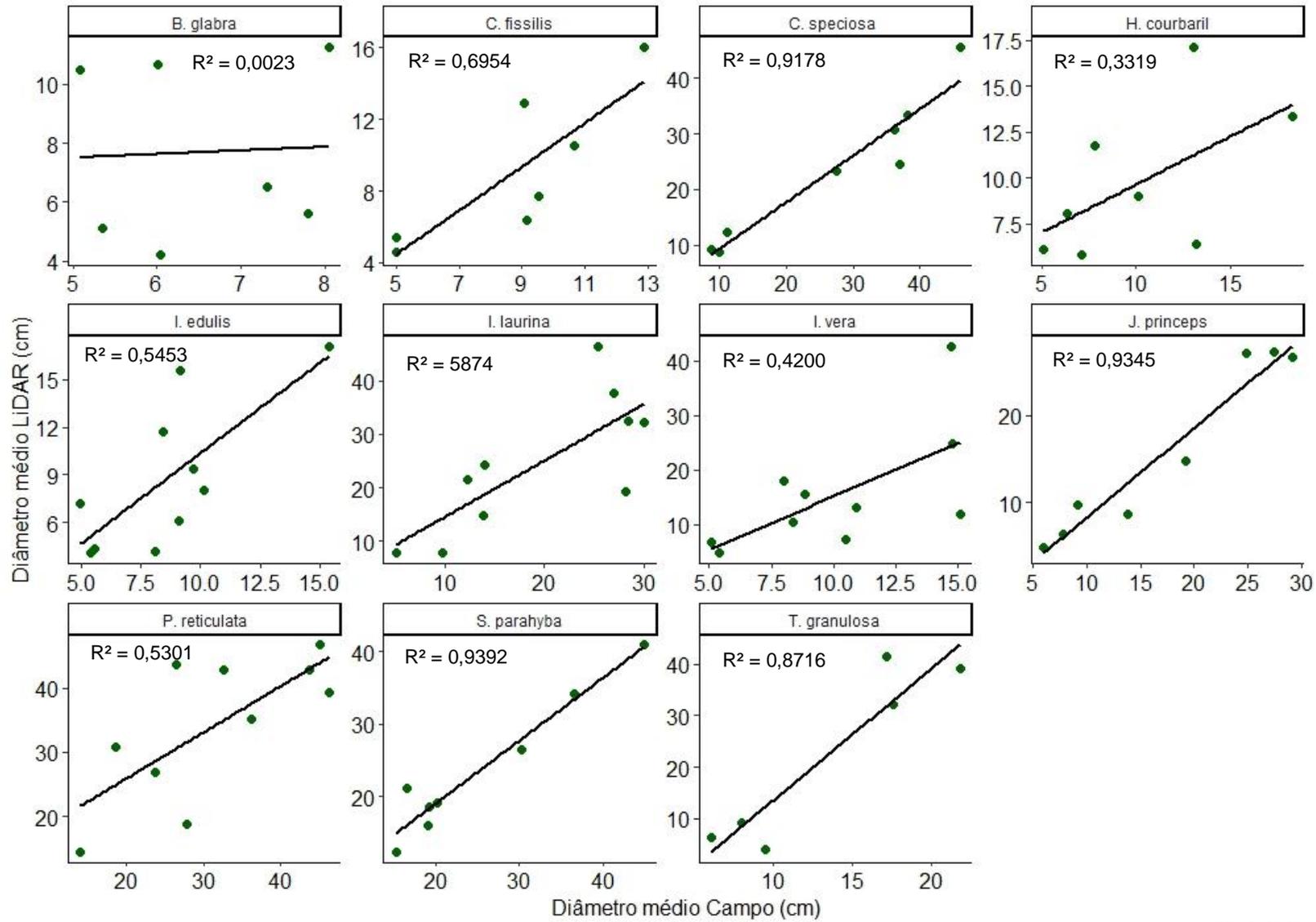


É possível visualizar também pelos gráficos de erro em porcentagem uma tendência de subestimar os valores de diâmetros abaixo de 10 centímetros (Figura 12). Resultados de métricas subestimadas para árvores menores também foram encontradas por Viana (2019). A subestimação dos diâmetros pode estar relacionada ao sombreamento de pontos no caso de árvores menores, já que suas

copas estão em menores alturas, como também pode ocorrer sombreamento de árvores no entorno (LEONARDO *et al.*, 2017; ZASADA *et al.*, 2013).

Em uma análise do gráfico de dispersão (Figura 13) a nível de espécies é possível aferir que as espécies *J. princeps*, *S. parahyba* e *C. speciosa* obtiveram um ajuste satisfatório estando com coeficiente de determinação acima de 0,90. Já a Castanha Mineira obteve um ajuste insatisfatório estando com um ajuste de 0,0023, a causa foi relacionada a uma característica morfológica visualizadas nas espécies existentes no plantio, em que seus galhos são formados em camadas. Uma vez que os galhos são lançados na região de 1,30 metros dificulta a extração de métricas de DAP pela nuvem de pontos.

Figura 12 – Gráficos de dispersão de DAP das respectivas espécies.



Fonte: Autor

5.3 Análise dos dados de altura total por meio do PLS

Para os dados de altura total obtidos com PLS os RMSE (%) geral foi de 15,14 %, enquanto seu Viés (%) foi de 17,73 % (Tabela 11). O trabalho de Olofsson *et al.* (2014) chegou a valores de 17,60 % de RMSE (%) mensurando a altura total de espécies de *Picea abies* L. Karst., *Pinus sylvestris* L. e *Betula spp.*, em suas justificativas coloca que a estatística foi alcançada devido árvores pequenas estarem próximas a árvores de grande porte o que levou a competição de copa e a superestimar os resultados de altura. Já as parcelas de Liang & Hyypä (2013) obtiveram uma variação de 12,22% a 21,29 % de RMSE (%) utilizando as mesmas espécies.

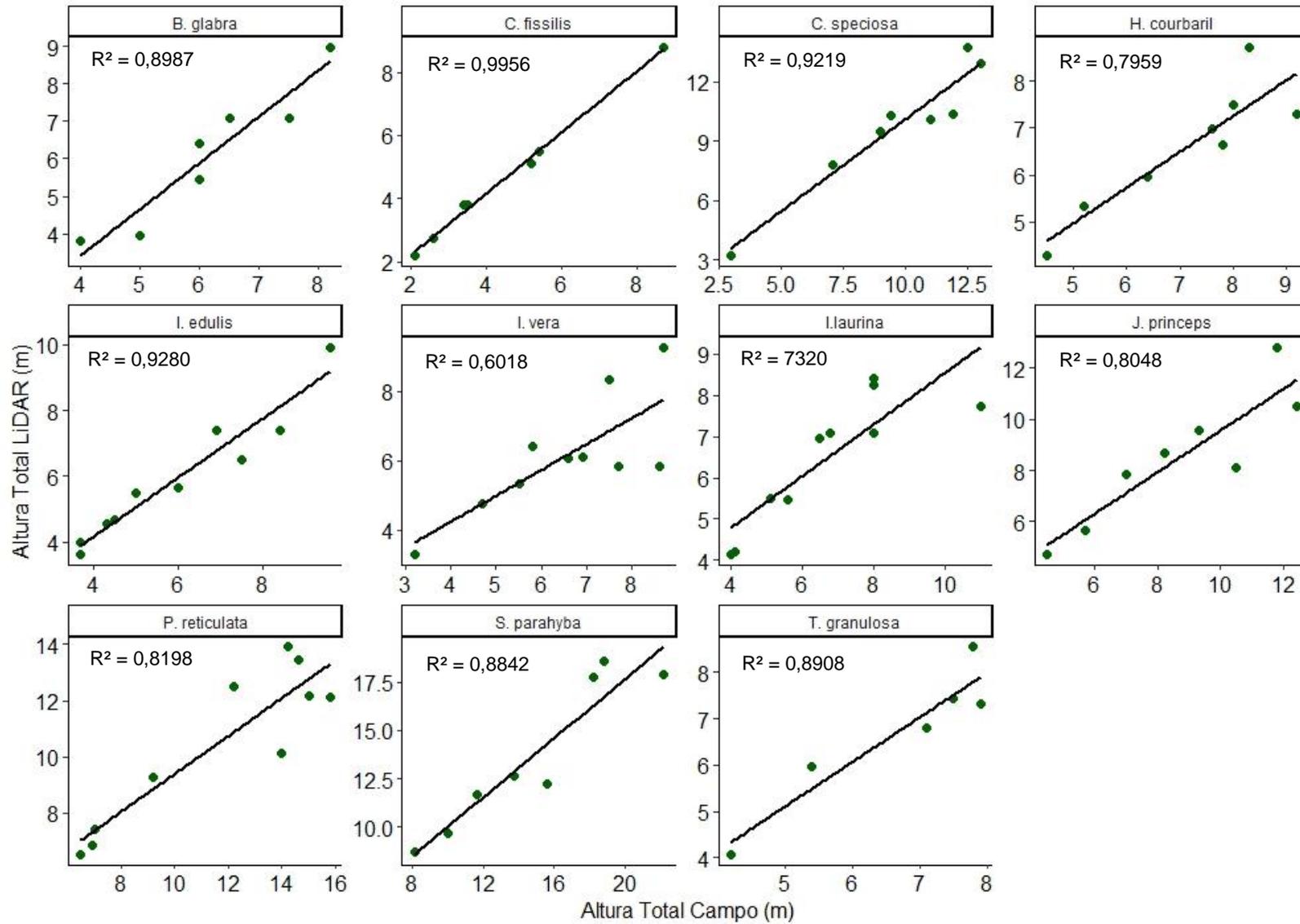
Tabela 11 - Tabela contendo as espécies, e análises estatísticas (RMSE e Viés).

Espécies	RMSE	RMSE(%)	Viés	Viés (%)
Geral	1,1716	15,1366	1,3728	17,7347
<i>B. glabra</i>	0,6277	10,2866	0,3940	6,4565
<i>C. fissilis</i>	0,2069	4,5368	0,0428	0,9385
<i>J. princeps</i>	1,1912	14,0330	1,4189	16,7159
<i>S. parahyba</i>	1,9814	14,5059	3,9259	28,7420
<i>I. laurina</i>	1,1073	17,0809	1,2261	18,9134
<i>I. edulis</i>	0,5318	8,9841	0,2828	4,7778
<i>I. vera</i>	1,1623	18,9901	1,3509	22,0719
<i>H. courbaril</i>	0,8708	13,2196	0,7584	11,5121
<i>C. speciosa</i>	0,8809	9,0363	0,7760	7,9603
<i>T. granulosa</i>	0,4686	7,0044	0,2196	3,2823
<i>P. reticulata</i>	1,9567	18,7676	3,8287	36,7225

Dentre as espécies estudadas apenas 4 espécies estudadas obtiveram RMSE (%) abaixo de 10%, sendo elas a *C. speciosa*, *I. edulis*, *T. granulosa* e *C. fissilis*, sendo o *C. fissilis* a única espécie com o RMSE (%) abaixo de 5%. O *C. fissilis* é uma espécie com características de tronco circular e retilíneo, geralmente só apresenta condições de tortuosidade e brotações quando os indivíduos são atacados por broca do ponteiro (*Hypsipila grandela*) (GANDARA, 2009). Deve ser levado em consideração também que o *C. fissilis* foi a espécie com menor média de altura dentre as 11 espécies estudadas, apresentando menos riscos por oclusões

causados pela copa ou aglomerações de folhas, o que comumente ocorre com espécies de maior porte (DASSOT; CONSTANT; FOURNIER, 2011; FAVORSKAYA; JAIN, 2017). É possível verificar um bom ajuste as coeficiente de determinação das espécies também, especialmente *C. fissilis*, que obteve um ajuste de 0,99 (Figura 14).

Figura 13 – Gráficos de dispersão de DAP das respectivas espécies.



Fonte: Autor

Já as espécies com RMSE (%) superior a 15% foram o *I. laurina*, *P. reticulata* e *I. vera*. O *P. reticulata* foi a espécie com maiores médias de altura, e estudos vêm demonstrando a subestimação das alturas para árvores maiores. Fator esse relacionado à oclusão de pontos, sombreamentos e sobreposições causados pela copa e galhos, o que não permite a medição adequada das alturas (LIANG; HYYPPÄ, 2013; TAKOUDJOU *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2021). Já os indivíduos do gênero *inga*, apresentam características de ramos angulosos, diâmetros de copa que chegam a 3 a 4 metros de diâmetros mesmo em menores alturas, o que agrega em erros às medições de alturas (FALCÃO; CLEMENT, 2000; GIONGO *et al.*, 2010; POSSETTE; RODRIGUES, 2010).

Ao avaliar os gráficos de resíduos é possível visualizar uma tendência de subestimação das alturas conforme as alturas aumentam, chegando a um erro máximo de 32,21 % (Figura 15 e 16) para um indivíduo de *I. vera*. A subestimação de alturas (Figura 17) é colocada como resultados comuns para altura ao serem coletadas com TLS (VAN-LEEUEWEN; NIEUWENHUIS, 2010; LIANG *et al.*, 2016). No trabalho apresentado por Fonseca, (2018) o principal fator para subestimação das alturas está relacionado ao sombreamento das alturas, fato esse agravado em árvores de maior porte, em que a densidade de pontos no topo da árvore é reduzida.

Figura 14 - Gráfico de dados estimados (obtidos por meio do PLS), por dados observados (obtidos por inventário tradicional).

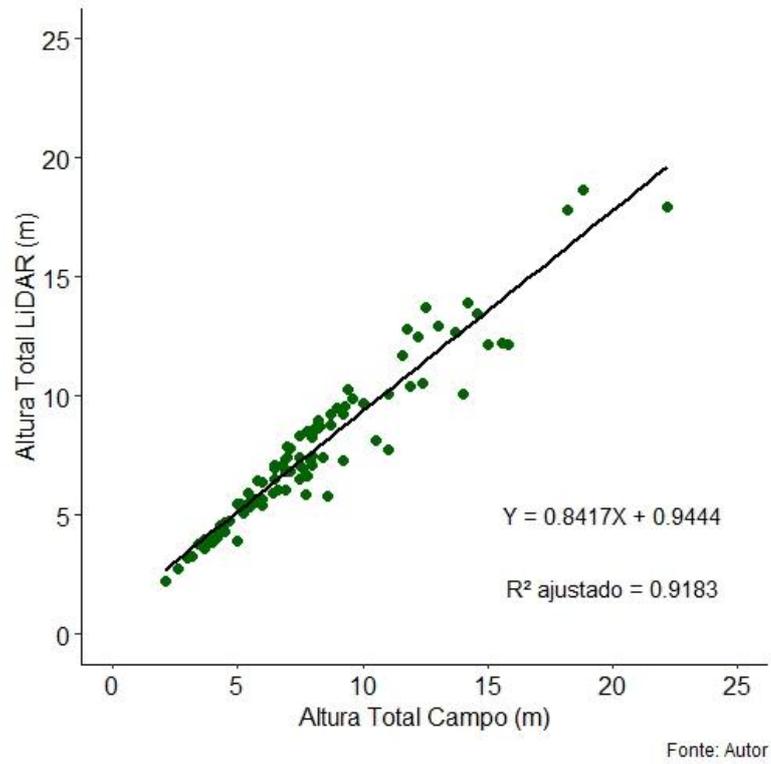
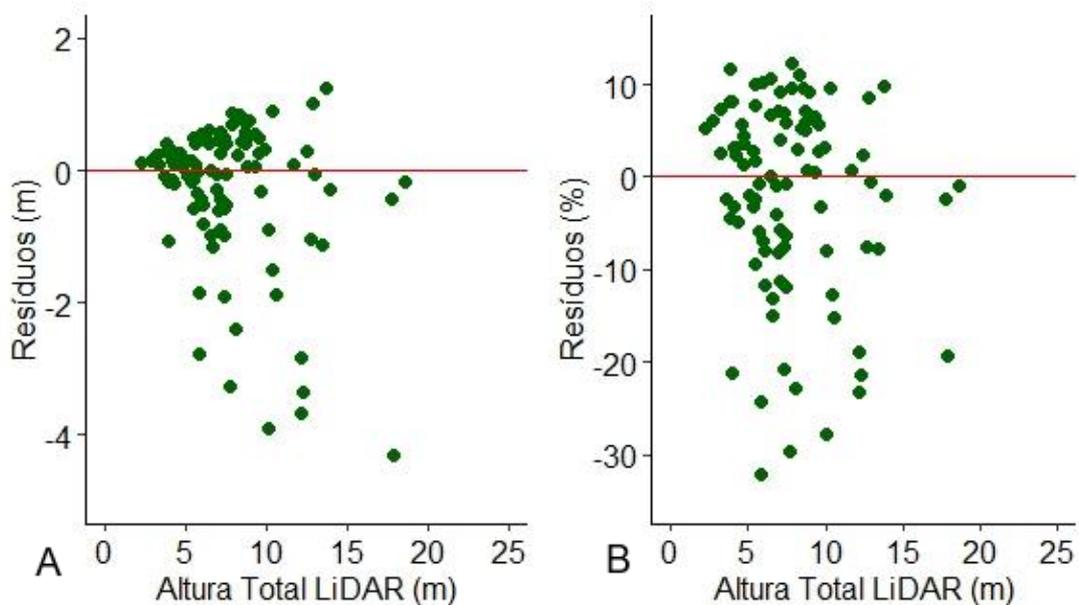


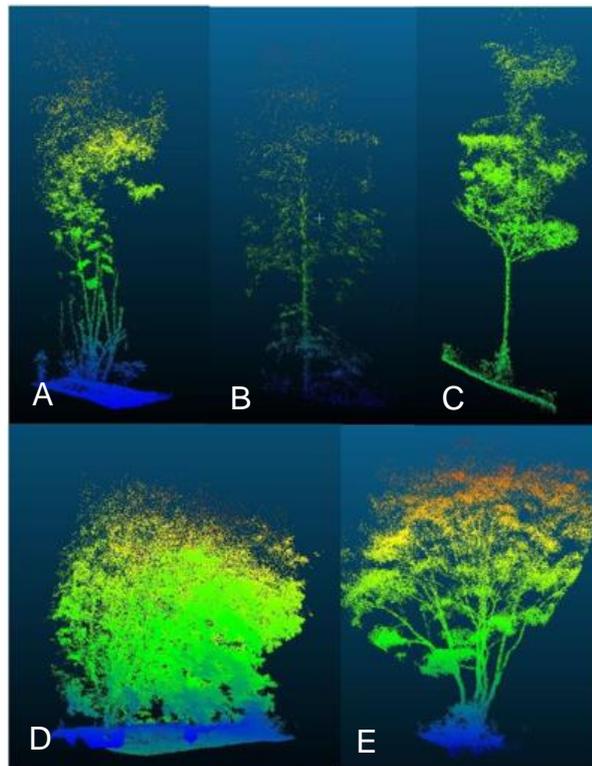
Figura 15 - Gráfico de resíduos para dados de diâmetro médio em centímetros (A) e gráfico de resíduos em percentagem (B).



Fonte: Autor

Figura 16 - Figura ilustrativa de nuvem de pontos de indivíduo de arbóreo com copa subestimada. A - Nuvem de pontos de *T. granulosa*; B - Nuvem de pontos de

C. speciosa; C – Nuvem de pontos de *B. glabra*; D - Nuvem de pontos de *I. laurina*; e E – Nuvem de pontos de *P. reticulata*.



Fonte: Autor

As estatísticas encontradas foram semelhantes ou até melhores a dados coletados com novas tecnologias para mensurar altura de árvores em florestas. Martello et al, 2022 buscando obter altura de talhões de *Eucalyptus* por meio fotogrametria aérea encontrou RMSE de 3,94 metros, valor superior ao mostrado pelo estudo que chegaram a centímetros. Já Harfouche et al, 2019 utilizando diferentes tipos de aplicativos de *smartphones* encontrou resultados de RMSE variando de 18,01% à 43,31% para árvores isoladas e 13,47% a 22,47% para plantios de *Eucalyptus* sp. Dessa forma tecnologia LiDAR veem se provando potencial para pesquisas relacionadas a estimação de altura total de árvores e florestas.

6 CONCLUSÃO

A individualização das árvores se provou um desafio, dado o fato da alta variabilidade de crescimento e morfologia dentre as espécies. Devendo assim buscar ou desenvolver alternativas para desenvolver a atividade de forma mais otimizada e com menor ocorrência de erros.

Os dados de diâmetro à altura do peito obtiveram um erro significativamente alto para determinadas espécies, se provando ser uma métrica complexa de se trabalhar utilizando o *Personal Laser Scanner*. Já as métricas de altura total foram obtidas com maior precisão, e semelhante às estatísticas encontradas na literatura, provando ser um equipamento adequado para obtenção de métrica de altura. Da mesma forma que para diâmetro à altura do peito é válido o aperfeiçoamento de *softwares* e programas para obter variáveis dendrométricas mais precisas.

REFERÊNCIAS

- AASEN, H. et al. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015. v. 108, p. 245–259. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002>>.
- ALMEIDA, G. J. F. Uso do laser scanner terrestre na estimativa de parâmetros biométricos em povoamentos florestais. Universidade de São Paulo. 2018.
- ALMEIDA, I.; RÖSCH, C.; SAHA, S. Comparison of ecosystem services from mixed and monospecific forests in Southwest Germany: A survey on public perception. *Forests*, 2018. v. 9, n. 10.
- ALON, A. S. Tree Extraction of Airborne LiDAR Data Based on Coordinates of Deep Learning Object Detection from Orthophoto over Complex Mangrove Forest. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2020. v. 8, n. 5, p. 2107–2111.
- ALSADIK, B.; KARAM, S. The simultaneous localization and mapping (SLAM)-An overview. *Surv. Geospat. Eng. J*, v. 2, p. 34-45, 2021.
- AMARAL, F. C. S. Do et al. Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 2004. n. 63, p. 95 p.
- ANDRADE, V. C. L.; GAMA, R. Da C.; TERRA, D. L. C. V. Revisão sobre modelos volumétricos empregados em povoamentos florestais brasileiros. *Advances in Forestry Science*, 16 abr. 2019. v. 6, n. 1, p. 561. Disponível em: <<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/7313>>.
- ASSIS, A. L. De et al. Development of a sampling strategy for youn stands of *Eucalyptus* sp. using geostatistics. *Cerne*, 2009. v. 15, p. 166–173.
- ASTRUP, R. et al. Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014. v. 44, n. 6, p. 666–676.
- AYREY, E. et al. Layer Stacking: A Novel Algorithm for Individual Forest Tree Segmentation from LiDAR Point Clouds. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2017. v. 43, n. 1, p. 16–27. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/07038992.2017.1252907>>.
- BARBOSA, L. M. et al. Lista de espécies indicadas para Restauração Ecológica para diversas regiões do Estado de São Paulo. São Paulo: Botânica, Instituto de, 2017.
- BAUWENS, Sébastien et al. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests*, 2016. v. 7, n. 6.

BELAND, M. et al. On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. *Forest Ecology and Management*, 2019. v. 450.

BIENERT, A. et al. Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters. *International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2006. v. 36, n. May 2012, p. 5.

BOGDANOVICH, E. et al. Using terrestrial laser scanning for characterizing tree structural parameters and their changes under different management in a Mediterranean open woodland. *Forest Ecology and Management*, 2021. v. 486, n. December 2020, p. 118945. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118945>>.

BUNGENSTAB, D. J. *Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável*. 1a ed. Campo Grande, MS: Embrapa gado de Corte, 2011.

CALDERS, K. et al. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution*, 2015. v. 6, n. 2, p. 198–208.

CALDERS, K. et al. Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. *Remote Sensing of Environment*, 2020. v. 251, n. September, p. 112102. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>>.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, Helio Garcia. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 4ª Edição ed. Viçosa, MG, 2013.

CARSON, W. W. et al. LiDAR applications in forestry - an overview. *ASPRS Annual Conference Proceedings*, 2004. p. 1–9.

CEZANA, D. P. et al. Efeito De Diferentes Classes De Altura E Intensidades De Desrama Artificial Sobre O Crescimento De Um Híbrido De Eucalipto. *Floresta*, 2012. v. 42, n. 1, p. 137.

CHEIN, F. *Introdução aos modelos de regressão linear: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas*. 2019.

CUNHA NETO, E. M. et al. Using high-density UAV-Lidar for deriving tree height of *Araucaria Angustifolia* in an Urban Atlantic Rain Forest. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2021. v. 63, n. May.

CURTO, R. A. et al. Cubagem de árvores em pé com dendrômetro óptico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 2019. v. 39, n. 1.

CURTO, R. D. A. et al. Métodos De Estimação De Altura De Árvores Em Floresta Estacional Semidecidual. *Floresta*, 2013. v. 43, n. 1, p. 105.

DALLA CORTE; A. C. et al. Aplicações do LiDAR para o inventário florestal. Atena, 2022.

DASSOT, M.; CONSTANT, T.; FOURNIER, M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 2011. v. 68, n. 5, p. 959–974.

DICKINSON, G.; BRISTOW, M.; HUTH, J. Mixed-species Plantations : Extending the Science. 2008. n. 08, p. 66.

DINIZ, F. S. Métodos de amostragem e geoestatística aplicados ao inventário florestal. Universidade Federal de Lavras.

DUBAYAH, R. O.; DRAKE, J. B. Lidar remote sensing for forestry. *Journal of Forestry*, 2000. v. 98, p. 44–46.

DURIGAN, G.; GARRIDO, M. A. De O. Dendrometria de Essências Nativas. *Anais - 2o Congresso Nacional sobre Essências Nativas*, 1992. v. 1, p. 5.

EMBRAPA. Ingá-Ferradura. Colombo, PR: Embrapa, 2006.

FALCÃO, M. A.; CLEMENT, C. R. Fenologia e produtividade do ingá-cipó (*Inga edulis*) na Amazônia Central. *Acta Amazonica*, 2000. v. 30, p. 173–180.

FARIA, B. F. P. *Teste F na regressão linear múltipla para dados temporais em correlação serial* (Doctoral dissertation). 2011.

FARIA, J. T. et al. Influência da mato-competição de capim-braquiária no crescimento inicial de espécies florestais em plantio misto. *Revista de Ciências Agroambientais*, v. 16, n. 1, p. 62-71, 2018.

FAVARIN, J. A. S. Dados de sensor LiDAR na identificação e caracterização de clareiras e estradas na floresta Amazônica. Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

FAVORSKAYA, M. N.; JAIN, L. C. *Handbook on Advances in Remote Sensing and Geographic Information Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2017. V. 122.

FINGER, C. A. G. *Biometria Florestal*. Santa Maria, RS: Santa Maria: CEPEF, 2006.

FONSECA, A. L. B. Estimacão de volume de madeira em povoamento de eucalipto utilizando dados de laser scanner terrestre. Tese, Universidade Federal de Viçosa, 2018.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. *Curso de Estatística*. 6a ed. São paulo: Atlas, 1996.

- FOREST, 3D. 3D Forest. Departmente of Forest Ecology.,The Silva Tarouca Reserch Institute, 2022. Disponível em: <<https://www.3dforest.eu/>>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- GANDARA, F. B. Diversidade genética de população de Cedro (*Cedrela fissilis* Vell. (Meliaceae) no Centro-Sul do Brasil. Universidade de São Paulo.
- GARCÍA, M. et al. Canopy clumping appraisal using terrestrial and airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 2015. v. 161, p. 78–88. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.030>>.
- GIONGO, M. et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 2010. v. 30, n. 63, p. 231–244.
- GOLLOB, C. et al. Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing*, 2020. v. 12, n. 9.
- GOLLOB, C. et al. Measurement of forest inventory parameters with apple ipad pro and integrated lidar technology. *Remote Sensing*, 2021. v. 13, n. 16, p. 1–35.
- GORGENS, E. B.; SILVA, A. G. P. LiDAR: Aplicações florestais. 1. ed: Editora CRV, 2014.
- GUJARATI, D. N., & PORTER, D. C. *Econometria básica-5*. Amgh Editora. 2011.
- GREENVALLEY. LIDAR360: Point Cloud Post-Processing Software. GreenValley International, 2022. Disponível em: <<https://greenvalleyintl.com/LiDAR360/>>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- GUEDES, I. C. L. Uso de métodos da estatística espacial em biometria e inventário florestal. Universidade Federal de Lavras. 2014.
- HARFOUCHE, T. B. et al. Uso de aplicativos em smartphone para medições de árvores. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 4, n. 1, p. 07-15, 2019.
- HENNING, J. G.; RADTKE, P. J. Detailed Stem Measurements of Standing Trees from Ground-Based Scanning Lidar. *Forest Science*, 2006. p. 14.
- HENTZ, Â. M. K. Obtenção de informações dendrométricas para inventário florestal automatizado por meio de veículo aéreo não tripulado (VANT). Universidade Federal do Paraná. 2018
- HOFFMANN, R. *Análise de regressão: uma introdução à econometria*. 2016.
- IBGE. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. 2a ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012.
- SILVA, G. F. et al Influência de diferentes fontes de erro sobre as medições de alturas de árvores. *Cerne*, 2012. v. 18, n. 3, p. 397–405.

JAAKKOLA, A. et al. Autonomous collection of forest field reference—The outlook and a first step with UAV laser scanning. *Remote Sensing*, 2017. v. 9, n. 8, p. 1–12.

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

KERSHAW, J. A. et al. *Forst Mensuration*. 5a ed. John Wiley & Sons, 2016.

KO, C. et al. Comparison of forest inventory methods at plot-level between a backpack personal laser scanning (Bpls) and conventional equipment in Jeju Island, South Korea. *Forests*, 2021. v. 12, n. 3, p. 1–13.

KOCH, B.; HEYDER, U.; WEINACKER, Holger. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 72, n. 4, p. 357-363, 2006.

LARJAVAARA, M.; MULLER-LANDAU, H. C. Measuring tree height: A quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*, 2013. v. 4, n. 9, p. 793–801.

LATORRACA, J. V. De F. et al. Dendrocronologia de árvores de *Schizolobium parahyba* (vell.) s. f. blake de ocorrência na rebio de tinguá-RJ. *Revista Árvore*, 2015. v. 39, p. 385–394.

LAURO, A. C. et al. Operacionalidade de instrumentos na obtenção da altura total de árvores em sistema agrossilvipastoril. *Advances in Forestry Science*, 2018. v. 5, n. 4, p. 445–451. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/6166>>.

LE, H. D. et al. A Comparison of Growth, Structure and Diversity of Mixed Species and Monoculture Reforestation Systems in the Philippines. *Journal of Sustainable Forestry*, 2021. v. 40, n. 4, p. 401–430.

LEEUWEN, M. VAN; NIEUWENHUIS, M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 1 jul. 2010. v. 129, n. 4, p. 749–770. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10342-010-0381-4>>.

LEONARDO, A. et al. Tree detection in point clouds derived from terrestrial laser scanning. 2017. p. 21–38.

LI, J. et al. 3D forest mapping using a low-cost UAV laser scanning system: Investigation and comparison. *Remote Sensing*, 2019. v. 11, n. 6, p. 1–21.

LIANG, X. et al. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012. v. 50, n. 2, p. 661–670.

LIANG, X. et al. Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services. *Sensors (Switzerland)*, 2014. v. 14, n. 1, p. 1228–1248.

LIANG, X. et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016. v. 115, p. 63–77. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>>.

LIANG, X.; HYYPPA, J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors (Switzerland)*, 2013. v. 13, n. 2, p. 1614–1634.

LICHTI, D.; PFEIFER, N.; MAAS, H.-G. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*— Theme issue “Terrestrial Laser Scanning”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ago. 2006. v. 60, n. 5, p. 359. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271606000669>>.

LIMA, J. P. C. De et al. Absorção de nitrogênio para *Schizolobium parahyba* (vell.) blake, em fase de viveiro em três ambientes. *Floresta e Ambiente*, 2000. v. 7, p. 11–18.

LIMA, N. S. Amostras virtuais no monitoramento da produção florestal. Universidade Estadual Paulista. 2018

LOCONTE, C. O. A sustentabilidade volumétrica do manejo florestal madeireiro. Universidade de São Paulo. 2018

LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 1. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2000.

LOVELL, J. L. et al. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011. v. 66, n. 1, p. 46–55. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.08.006>>.

MA, K. et al. Performance and Sensitivity of Individual Tree Segmentation Methods for UAV-LiDAR in Multiple Forest Types. *Remote Sensing*, 2022. v. 14, n. 2.

MACHADO, S. A.; FILHO, A. F. Dendrometria. 2ª ed. Curitiba, PR: UNICENTRO, 2009.

MALTAMO, M.; NAESSET, E.; VAUHKONEN, J. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. V. 27.

MARTELLO, M. et al. Estimativa de altura de um teste clonal de *Eucalyptus* em diferentes idades utilizando imagens aéreas de baixa altitude. *Scientia Forestalis*, v. 50, p. 1-13, 2022.

MARTINS, E. R. et al. Configuração de redes neurais artificiais para estimação da altura total de árvores de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 30 jun. 2016. v. 11, n. 2, p. 117–123.

Disponível em:
<<http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v11i2a5373>>.

MARTINS, F. B. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. *Revista Brasileira de Climatologia*, 2018. v. 1.

MATOS, M. A. Manual operacional para a regressão linear. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 63. 1995.

MAYRINCK, R. C. et al. Avaliação de hipsômetros e operadores na mensuração de árvores de *Eucalyptus urograndis* de tamanhos diferentes. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 2016. v. 11, n. 5, p. 90.

MCGAUGHEY, R. J. FUSION/LDV LIDAR analysis and visualization software. Pacific Northwest Reserch Sation: USDA Forest Service, 2022. Disponível em: <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusion_overview.html>. Acesso em: 6 ago. 2022.

MELLO, José Marcio De; SCOLFORO, José Roberto S. Análise comparativa de procedimentos de amostragem em um remanescente de floresta estacional semidecídua montana. *Revista Árvore*, 2000. v. 24, p. 47–54.

MELO, A. C. G.; DURINGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil Carbon sequestration by planted riparian forests in Paranapanema Valley, SP, Brazil. *Scientia Forestalis*, 2006. n. 71, p. 149–154.

MENGESHA, T.; HAWKINS, M.; NIEUWENHUIS, M. Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods. *European Journal of Forest Research*, 2015. v. 134, n. 2, p. 211–222.

MIRANDA, D. L. C. et al. Crescimento de híbridos de eucalipto no estado de Mato Grosso. *Advances in Forestry Science*, 2019. v. 6, n. 2, p. 617–621.

MOREIRA, B. M. et al. Assessment of the influence of survey design and processing choices on the accuracy of tree diameter at breast height (Dbh) measurements using uav-based photogrammetry. *Drones*, 2021. v. 5, n. 2.

MÜLLER, M. D. et al. O Eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) na Mata Atlântica. Embrapa Gado de Leite-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E). 1a ed. Brasília, DF: Embrapa, 2021, p. 18.

MÜLLEROVÁ, J. et al. Unmanned aircraft in nature conservation: an example from plant invasions. *International Journal of Remote Sensing*, 2017. v. 38, n. 8–10, p. 2177–2198.

NAVARRO, A. et al. The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate above-ground biomass of mangrove ecosystems. *Remote Sensing of Environment*,

2020. v. 242, n. February, p. 111747. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111747>>.

NICOLETTI, M. F.; SILVA, E.; FLORIANI, M. M. P. Metodologia Não Destrutiva Para Quantificação Do Volume E Biomassa Do Fuste Em Remanescente Florestal. *Nativa*, 2015. v. 3, n. 4, p. 287–291.

NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 1996. v. 56, n. 1, p. 1–7.

NISGOSKI, S. et al. Características anatômicas da madeira e índices de resistência do papel de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake proveniente de plantio experimental. *Scientia Forestalis*, 2012. v. 40, p. 203–211.

OLIVEIRA, L. T. et al. Influência da idade na contagem de árvores de *Eucalyptus* sp. com dados de lidar. *Cerne*, v. 20, p. 557-565, 2014a.

OLIVEIRA, L. T. de et al. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, p. 692-700, 2014b.

OLOFSSON, K.; HOLMGREN, J.; OLSSON, H. Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm. *Remote Sensing*, 2014. v. 6, n. 5, p. 4323–4344.

OLSOY, P. J. et al. Aboveground total and green biomass of dryland shrub derived from terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014. v. 88, n. February, p. 166–173. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.12.006>>.

PAULA, G. A. *Modelos de regressão: com apoio computacional* (pp. 28-55). São Paulo: IME-USP. 2004.

PEÑA-CLAROS, M. et al. Regeneration of commercial tree species following silvicultural treatments in a moist tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 2008. v. 255, n. 3–4, p. 1283–1293.

PETER, J. et al. Forest structural estimates derived using a practical, open-source lidar-processing workflow. *Remote Sensing*, 2021. v. 13, n. 23.

PINHEIRO, A. L. B.; ALMEIDA, P. F. De; SOARES, L. G. P. Princípios fundamentais dos lasers e suas aplicações. *Biotechnology Aplicada à Agro&Indústria - Vol. 4*, 2017. p. 815–894.

PINTO JÚNIOR, J. E.; SILVEIRA, R. A. A introdução do eucalipto no Brasil pela Embrapa: bases institucionais e sua estruturação para a pesquisa com eucaliptos e corímbias. *O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento*. 1a ed. Brasília, DF: Embrapa, 2021, p. 80.

PIOTTO, D. A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. *Forest Ecology and Management*, 2008. v. 255, n. 3–4, p. 781–786.

POSSETTE, R. F. Da S.; RODRIGUES, W. A. O gênero *Inga* Mill. (Leguminosae – Mimosoideae) no estado do Paraná, Brasil. *Acta botânica brasileira*, 2010. v. 24, p. 354–368.

PRETZSCH, H. et al. Silvicultural prescriptions for mixed-species forest stands. A European review and perspective. *European Journal of Forest Research*, v. 140, n. 5, p. 1267-1294, 2021.

RASCÃO, M. S. R. C. Aquisição de dados LiDAR com TLS e HMLS para detecção de árvores individuais. 2019.

REX, F. E. et al. Uso de dados LiDAR na estimativa de variáveis biofísicas na Amazônia, sob diferentes resoluções espaciais. *Nativa*, 2018. v. 6, p. 841.

REX, F. E.; KÄFER, P. S.; DALLA CORTE, A. P. Vants: Potenciais Para a Engenharia Florestal. *Geociência, sociedade e sustentabilidade: Uma coletânea de artigos*. 1a ed. Piracanjuba - GO: Conhecimento Livre, 2020, p. 21.

RIBAS, R. P. Individualização de árvores em ambiente florestal nativo utilizando métodos de segmentação em modelos 3D produzidos a partir da tecnologia LiDAR: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

RUSSO, D. et al. Tree growth and wood quality in pure vs. mixed-species stands of European beech and Calabrian pine in Mediterranean mountain forests. *Forests*, 2020. v. 11, n. 1, p. 1–18.

SANQUETTA, C. R. et al. Inventários Florestais: Planejamento e Execução. 2a ed. Curitiba: Ampliada, Revista, 2009.

SANTOS, D. W. S.; STEPKA, T. F. Modelagem da Distribuição Diamétrica de Cinco Espécies Comerciais Nativas da Amazônia, no Estado do Pará. *Silvicultura e Manejo Florestal: Técnicas de Utilização e Conservação da Natureza - Volume 1*, 2021. p. 259–268.

SANTOS, M. F. Dos et al. Eficiência de equações volumétricas para *Manilkara* spp. em floresta manejada na Amazônia oriental. *Nativa*, 2019. v. 7, n. 5, p. 621.

SCHILLING, A. Automatic retrieval of skeletal structures of trees from terrestrial laser scanner data. 2014. n. October, p. 129. Disponível em: <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/15569/Dissertation_Anita_Schilling_1.pdf>.

SCHNEIDER, F. D. et al. Quantifying 3D structure and occlusion in dense tropical and temperate forests using close-range LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019. v. 268, n. December 2018, p. 249–257. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.033>>.

SCOLFORO, J. R. S.; LIMA, J. T.; SILVA, S. T. Equações de biomassa e volume para cerrado sensu stricto. Congresso Florestal Panamericano, 1993. v. 1, p. 508–510.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.

SFB. Florestas do Brasil em resumo. Serviço Florestal Brasileiro. 2013.

SHIOTA, H. Biodiversity Management & Forestry The Effects of Cell Size and Filtering Range on Automatically Extracted Tree Number and Average Tree Height Using Light Detection and Ranging Data in Fusion /. 2020. p. 1–7.

SILVA, Gilson F.; MÔRA, R.; CURTO, Rafaella De A. Simulação de erros na medição de altura de árvores inclinadas com aparelhos baseados em princípios trigonométricos. *Nativa*, 2017. v. 5, n. 5, p. 372–379.

SILVA, Gilson Fernandes et al. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. *Revista Arvore*, 2012. v. 36, n. 2, p. 341–348.

SILVA, J. A. A.; NETO, F. P. Princípios Básicos de Dendrometria. Recife, PE:, 1979.

SILVA, Sérgio Teixeira Da et al. Uso de imagens de sensoriamento remoto para estratificação do cerrado em inventários florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 2014. v. 34, n. 80.

SIMÕES, A. C. B. Sensorização 3D e Controlo de Manipuladores Industriais através de uma plataforma de baixo custo. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. De P.; SOUZA, A. L. De. Dendrometria e inventário florestal. 2a ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2011.

SOUZA FRUTUOSO, L. M. et al. Métodos De Medição De Altura Em Fragmento De Floresta Estacional Decidual. *Nativa*, 2020. v. 8, n. 5, p. 610–614.

STOVALL, A. E. L. et al. Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 2017. v. 200, n. July, p. 31–42. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.013>>.

TAKOUDJOU, S. M. et al. Using terrestrial laser scanning data to estimate large tropical trees biomass and calibrate allometric models : A comparison with traditional destructive approach. 2018. v. 2018, n. September 2017, p. 905–916.

TANG, L.; SHAO, G. Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 2015. v. 26, n. 4, p. 791–797.

TAYLOR, C. J. Introdução à silvicultura tropical. São Paulo: [s.n.], 1969.

TONINI, H. et al. Effect of planting system and solar exposure on biomass allocation in the initial growth of eucalyptus. *Ciencia Florestal*, 2019. v. 29, n. 1, p. 86–95.

THOMAS, A. et al. Growth dynamics of fast-growing tree species in mixed forestry and agroforestry plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 480, p. 118672, 2021.

TROCHTA, J. et al. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLOS ONE*, 4 maio. 2017. v. 12, n. 5, p. e0176871. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0176871>>.

UBIALLI, J. A. et al. Comparação de métodos e processos de amostragem para estimar a área basal para grupos de espécies em uma floresta ecotonal da região norte matogrossense. *Acta Amazonica*, 2009. v. 39, n. 2, p. 305–314.

VASCONCELLOS, B. N. Estimativa de variáveis dendrométricas individuais de *Araucaria angustifolia* por meio de dados laser scanner aéreo e terrestre. 2020. p. 166.

VIANA, A. B. T. Comparação entre o método de amostragem tradicional e por scanner terrestre (TLS) em floresta tropical secundária. Universidade Federal de Viçosa.

VIEIRA, S. Estatística para a qualidade: como avaliar com precisão a qualidade em produtos e serviços. 1a ed. Rio de Janeiro: Campus, 2011.

WEISS, N. A., & WEISS, C. A. *Introductory statistics*. London: Pearson. 2017.

WEST, P. W. *Growing Plantation Forests*. Cham: Springer International Publishing, 2014.

WHITE, J. C. et al. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2016. v. 42, n. 5, p. 619–641.

XU, D. et al. LiDAR applications to estimate forest biomass at individual tree scale: Opportunities, challenges and future perspectives. *Forests*, 2021. v. 12, n. 5, p. 1–19.

YAN, W. et al. An automated hierarchical approach for three-dimensional segmentation of single trees using UAV LiDAR data. *Remote Sensing*, 2018. v. 10, n. 12.

ZASADA, M. et al. Forest Ecology and Management Horizon visibility and accuracy of stocking determination on circular sample plots using automated remote measurement techniques. 2013. v. 302, p. 171–177.