

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE**

**MELBIN GOMEZ GUILLEN**

**METODOLOGIA DE INVENTÁRIO FLORESTAL AMOSTRAL DE  
PLANTADAS A PARTIR DE FOTOGRAFETRIA DIGITAL**

**RIO BRANCO  
ACRE - BRASIL  
FEVEREIRO - 2020**

MELBIN GOMEZ GUILLEN

METODOLOGIA DE INVENTÁRIO FLORESTAL AMOSTRAL DE  
PLANTADAS A PARTIR DE FOTOGRAFIA DIGITAL

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Acre, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Mestre em Ciência Florestal.

RIO BRANCO  
ACRE - BRASIL  
FEVEREIRO - 2020

---

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

---

G6332m Gomez Guillen, Melbin, 1993 -

Metodologia de inventário florestal amostral de plantadas a partir de fotogrametria digital / Melbin Gomez Guillen; orientador: Dr. Evandro Orfanó Figueiredo. – 2020.

62 f.; il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós – Graduação em Ciência Florestal, Mestre em Ciência Florestal, Rio Branco, 2020. Inclui referências bibliográficas e apêndice

1. 3D. 2. Biometria florestal. 3. Nuvem de pontos. I. Figueiredo, Evandro Orfanó (orientador). II. Título.

CDD: 634



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação/  
Centro de Ciências Biológicas e da Natureza  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal

ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA  
FLORESTAL, DO MESTRANDO: **MELBIN GOMEZ  
GUILLEN**, REALIZADA NO DIA 27 DE FEVEREIRO DE  
2020.

Às nove horas do dia vinte e sete do mês de fevereiro de 2020, na sala ambiente do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Acre, realizou-se a Defesa de Dissertação intitulada: **“Metodologia de inventário Florestal Amostral de plantadas a partir de Fotogrametria Digital”**, de autoria do mestrando: **Melbin Gomez Guillen**, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de Mestrado (UFAC). Na ocasião, a Comissão Examinadora esteve constituída pelos membros: **Dr. Evandro Orfanó Figueiredo (Presidente /Embrapa/ Acre)**, **Drª. Symone Maria de Melo Figueiredo (CCBN/ Ufac)**, **Dr. Elias Melo de Miranda (Membro externo/ Embrapa Acre)**. Logo após a exposição oral, houve arguição pelos examinadores e, ao final da arguição, reaberta a sessão pública, o discente foi considerado APROVADO pela Comissão Examinadora. E ao final, foi lavrada a presente ata, que será assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

\_\_\_\_\_  
Dr. Evandro Orfanó Figueiredo  
(Presidente /Embrapa/ Acre)

\_\_\_\_\_  
Symone Figueiredo  
Drª. Symone Maria de Melo Figueiredo  
(CCBN/ Ufac)

\_\_\_\_\_  
Elias Melo  
Dr. Elias Melo de Miranda  
(Membro externo/ Embrapa/ Acre)

Dedico este trabalho a Deus, meus pais: Francisca Guillen Lopez e Agustín Gomez López, meus irmãos: Olvin Gomez Guillen, Areli Gomez Guillen, Agustin Gomez Guillen, Lilian Gomez Guillen e Kevin Gomez Guillen.

**Dedico.**

## AGRADECIMENTOS

À Organização dos Estados Americanos (OEA) e o Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (GCUB).

À Universidade Federal do Acre (UFAC) e ao Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal (Ciflor) pelas oportunidades oferecidas.

A Embrapa, Acre, pelo apoio logístico e pela disponibilização de profissionais, equipamentos e do espaço físico para a realização da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de estudo.

Ao meu orientador Professor Dr. Evandro Orfanó Figueiredo pelos ensinamentos, pela paciência e dedicação e por indicar os caminhos necessários à realização deste trabalho.

Aos demais professores e colaboradores do Ciflor, que contribuem para a formação de mestres e para o desenvolvimento de tecnologias e novos conhecimentos.

Aos pesquisadores da Embrapa Acre, Msc Daniel Para e MSc Luiz Cláudio que sempre contribuíram com suas experiências e ensinamentos, assim como na análise estatística.

À minha família por “segurarem a barra” sempre me dando o apoio, incentivo e auxílio necessários em todos os momentos.

À Sonia Alemán, por sempre dar-me força e apoio necessário em todo momento.

A todos meus colegas de turma (Marcelo, Marcio, Égon, Gabriel, Arthur, Raquel, Aline, Wanderson) pelo apoio nas dificuldades das aulas, e em especial à Alexandra e o Uilian, pela ajuda, tanto na revisão da minha dissertação, como na coleta dos dados em campo.

Ao meu amigo do Equador Andrés Guato por me ajudar em todo momento, ao Edelin Jeam pela boa amizade e à Mary Silva por sempre me ajudar no Brasil.

Aos colegas de outros programas e turmas de mestrado, em especial ao Arnaldo Junior, que esteve presente apoiando diariamente durante os dois anos do mestrado e o colega Artur Neto Fidelis, que me apoiou na coleta de dados em campo.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS	<i>Airborne Laser Scanning</i>
B	Bloco
cf	Com folha
cGCP	Com pontos de controle no solo
cm	Centímetro
co	conglomerado
DAP	Diâmetro à altura do peito
DAPc	Diâmetro coletado em campo
DAPd	Diâmetro obtido em modelo digital
Ec	Época de coleta
EDAP	Erro médio do diâmetro
EH	Erro médio da altura
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ep	Erro padrão
fp	Forma de processamento
GCP	Pontos de controle no solo
GLONASS	Sistema de Navegação Global por Satélite
GNSS	<i>Global Navigation Satelite System</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
H	Altura
H <sub>C</sub>	Altura coletada em campo
H <sub>d</sub>	Altura obtida em modelo digital
IMU	<i>Inertial measurement unit</i>
ind	Individual
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
m	Metro
Mavic2	Mavic 2 Pro
MDS	Modelo digital de superfície
mm	Milímetro
n	Número
P	Probabilidade
P4Pro	Phantom 4 Pro
sf	Sem folhas
sGCP	Sem pontos de controle no solo
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanning</i>
UAS	Sistema de aeronaves não tripuladas
3D	Três dimensões

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Povoamento de <i>Tectona grandis</i> L.f. em período fenológico sem folhas Embrapa Acre, 2019. Fonte: Autor (2019).....	8
Figura 2. Distribuição de blocos na plantação de <i>Tectona grandis</i> L.f. Embrapa Acre, 2019.....	10
Figura 3. Georreferenciamento com receptor GNSS L1/L2. Em que: a) base e b) hover. Embrapa Acre, 2019.....	11
Figura 4. Equipamentos usados na obtenção dos projetos fotogramétricos. Em que; a) Phantom 4 Pro; b) Mavic 2 Pro .....	12
Figura 5. Caminhamento realizado para obtenção das fotos por bloco em que; a) seguindo a fila e b) seguindo as colunas, Rio Branco, Acre, 2019. Fonte: Autor. .....	14
Figura 6. Modelos do experimento com os efeitos e interações. Em que: P4Pro: Phantom 4 Pro, Mavic2: Mavic 2 Pro, cf: com folhas, sf: sem folhas, sGCP: sem pontos de controle no solo, cGCP: com pontos de controle no solo, ind: individual, co: conglomerado. ....	15
Figura 7. Processamento de bloco individual com pontos de controle.....	17
Figura 8. Mensuração de variáveis biométricas em nuvem de pontos, de forma conglomerada, sendo: a) mensuração do DAPd e, b) mensuração da Hd, Rio Branco, Acre, 2019.....	19
Figura 9. Sobreposição de árvores na nuvem de pontos no período sem folhas.....	28
Figura 10. Processamento de projetos fotogramétricos. Em que: a) com pontos de controle no solo e b) sem pontos de controle no solo.....	29
Figura 11. Distribuição do erro percentual na mensuração do DAPd nos modelos processados. Em que: a) cGCP e b) sGCP, em relação dos dados obtidos em campo de forma direta. ....	31
Figura 12. Distribuição do erro percentual na mensuração da altura Hd nos modelos processados. Em que: a) cGCP e b) sGCP, em relação aos dados obtidos em campo de forma direta. ....	32
Figura 13. Distribuição do erro percentual na mensuração do DAPd com os diferentes UAS. Em que: a) Phantom 4 Pro e b) Mavic 2 Pro, em relação ao DAPc.....	37
Figura 14. Distribuição do erro percentual na mensuração da altura Hd com os equipamentos. Em que: a) Phantom 4 Pro e b) Mavic 2 Pro, em relação à Hc.38	38
Figura 15. Distribuição percentual do erro na mensuração do DAPd nas diferentes épocas de coleta. Em que: a) sem folhas e b) com folha, em relação ao DAPc. .....	40
Figura 16. Modelos processados em duas fases fenológicas. Em que: a) com folhas e, b) sem folhas.....	41

Figura 17. Distribuição do erro percentual na mensuração da Hd nas duas fases fenológica. Em que: a) sem folhas e b) com folhas, em relação à Hc. ....	42
Figura 18. Distribuição do erro percentual na mensuração do DAPd na forma de processamento. Em que: a) individual e b) conglomerado, em relação ao DAPc. ....	43
Figura 19. Distribuição do erro percentual na mensuração Hd. Em que: a) de forma individual e b) em conglomerado, em relação à Hc. ....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de árvores por bloco no povoamento de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	9
Tabela 2. Características dos equipamentos empregados para execução dos projetos fotogramétricos, Rio Branco, Acre, 2019. Fonte DJI (2019). .....	12
Tabela 3 - Modelos de nuvem de pontos processados dos projetos fotogramétricos por bloco de forma individual de acordo com o número de repetições, Rio Branco, Acre, 2019.....	17
Tabela 4 - Modelos de nuvem de pontos processados dos projetos fotogramétricos de blocos em forma conglomerada. Rio Branco, Acre, 2019.....	18
Tabela 5 - Erro médio do pós-processamento dos pontos de controle no solo, Rio Branco, Acre, 2019.....	21
Tabela 6 - GSD e densidade de pontos médios gerados mediante o processamento individual nos blocos com os diferentes equipamentos nas fases fenológicas do povoamento, Rio Branco, Acre, Brasil, 2019.....	23
Tabela 7 - GSD e densidade de pontos médios gerados mediante o processamento conglomerado nos blocos com os diferentes equipamentos nas fases fenológicas do povoamento, Rio Branco, Acre, Brasil, 2019.....	23
Tabela 8 - Correlação parcial dos resíduos entre as variáveis DAPs e altura comercial .....	24
Tabela 9 - Análise de variância para o erro do DAP e altura comercial, entre efeitos e interações com respeito aos valores observados em campo .....	26
Tabela 10 - Nova análise de variância para o erro do DAP e HC, entre efeitos e interações com respeito aos valores observados em campo de forma direta....	33
Tabela 11 - Teste de médias para diferenças entre equipamentos, época de coleta, forma de processamento e interações do erro para o DAPd e Hd, Rio Branco, Acre, 2019.....	35

## RESUMO

GUILLEN GOMEZ, MELBIN. Universidade Federal do Acre, fevereiro de 2020. **Metodologia de inventário florestal amostral de plantadas a partir de fotogrametria digital.** Orientador: Evandro Orfanó Figueiredo. A obtenção de dados biométricos para inventários florestais com fins comerciais, como diâmetro à altura do peito e altura comercial adquiridos da maneira tradicionais, requer tempo e altos custos operacionais. Porém, com o surgimento e a evolução da fotogrametria digital junto a técnicas de processamento de imagens oferecem oportunidades de obter esses dados de forma automatizada. Portanto, o objetivo do estudo foi desenvolver uma nova metodologia para obtenção de dados biométricos por meio de diferentes projetos fotogramétricos usando UAS. A pesquisa foi desenvolvida em um povoamento de *Tectona grandis* L.f. tendo 13 anos de idade, foram estabelecidos 8 blocos de 10 m x 10 m de forma aleatória, sendo medida a altura comercial e o diâmetro à altura do peito de forma tradicional; depois foram estabelecidos pontos de controle no solo, por meio de sistema de posicionamento global por satélite pós-processado. Em seguida, foram executadas em campo projetos fotogramétricos considerando duas fases fenológicas (com e sem folhas) com dois equipamentos, Phantom 4 Pro e Mavic 2 Pro. As imagens, foram processadas de forma individual por parcela e conglomerado, com e sem pontos de controle no solo, no software *Pix4D Mapper*. Posteriormente, foi mensurado o diâmetro e altura comercial na nuvem de pontos no ambiente computacional 3D. O arranjo estatístico foi realizado de forma fatorial, analisando as variâncias e médias de cada efeito com as interações. Os resultados demonstraram que existe uma correlação de 0,9326 para diâmetro e 0,7328 para altura comercial em relação aos dados obtidos em campo de forma tradicional. O erro médio gerado na mensuração do diâmetro com o Phantom 4 Pro foi de  $-0,07 \pm 0,02$  centímetros e para altura comercial de  $-0,10 \pm 0,03$  metros, com a Mavic 2 Pro foi de  $-0,71 \pm 0,10$  centímetros para diâmetro e  $-0,36 \pm 0,04$  metros para altura comercial. Conclui-se que é possível adotar o procedimento para obtenção de dados biométricos com a fotogrametria para o inventário florestal amostral, considerando como padrão a adoção de pontos de controle nos processamentos.

**Palavras chaves:** 3D, Dados biométricos, Nuvem de pontos, Sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

GUILLEN GOMEZ, MELBIN. Federal University of Acre, February 2020. **Methodology of sampling forest inventory of plantations using digital photogrammetry.** Advisor: Evandro Orfanó Figueiredo. Obtaining biometric data for forest inventories for commercial purposes, such as diameter at chest height and commercial height acquired in the traditional way, requires time and high operating costs. However, with the emergence and evolution of digital photogrammetry together with image processing techniques, they offer opportunities to obtain this data in an automated way. Therefore, the objective of the study was to develop a new methodology for obtaining biometric data through different photogrammetric projects using UAS. The research was carried out in a stand of *Tectona grandis* L.f. being 13 years old, 8 blocks of 10 m x 10 m were established at random, the commercial height and the diameter at chest height being measured in a traditional way; then control points were established on the ground, using a post-processed global satellite positioning system. Then, photogrammetric projects were carried out in the field considering two phenological phases (with and without leaves) with two equipment, Phantom 4 Pro and Mavic 2 Pro. The images were processed individually by parcel and conglomerate, with and without control points on the ground, using the Pix4D Mapper software. Subsequently, the diameter and commercial height were measured in the point cloud in the 3D computational environment. The statistical arrangement was performed in a factorial way, analyzing the variances and means of each effect with the interactions. The results showed that there is a correlation of 0.9326 for diameter and 0.7328 for commercial height in relation to the data obtained in the field in the traditional way. The average error generated when measuring the diameter with the Phantom 4 Pro was  $-0.07 \pm 0.02$  centimeters and for commercial height of  $-0.10 \pm 0.03$  meters, with the Mavic 2 Pro it was  $-0.71 \pm 0.10$  centimeters for diameter and  $-0.36 \pm 0.04$  meters for commercial height. It is concluded that the use of ground control points has to be considered as standards to have more accurate data in a photogrammetric design and the camera focal length is one of the main elements to consider drawing the tree shapes well. It is conclude that it is possible to adopt the procedure for obtaining biometric data with photogrammetry for the sampling forest inventory, considering as standard the adoption of control points in the processing.

**Key-words:** 3D, Biometric data, Point cloud, Remote sensing.

## SUMÁRIO

págs.

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### RESUMO

### ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 Obtenção de dados biométricos da forma tradicional .....	3
2.2 Sensoriamento remoto aplicado na área florestal.....	4
2.3 Avanços na fotogrametria moderna .....	5
2.4 Algoritmo usado no processamento de fotos .....	6
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	8
3.1 Localização e caracterização da área de estudo .....	8
3.2 Atividades prévias para coleta dados .....	9
3.3 Arranjo experimental. ....	9
3.4 Pontos de controle no solo ( <i>Ground control points – GCP</i> ) .....	10
3.5 Coleta de dados de forma direta.....	11
3.6 Sistema de aeronaves não tripuladas (UAS) empregados para coleta de dados .....	11
3.7 Coleta de dados com UAS .....	12
3.7.1 Obtenção de fotos no povoamento de teca com e sem folha .....	13
3.8 Aplicativo, softwares e hardware empregado .....	14
3.9 Modelo experimental .....	15
3.10 Processamento de dados .....	16
3.10.1 Processamento dos GCP .....	16
3.10.2 Processamento de imagem.....	16
3.10.3 Processamento em bloco individual.....	16
3.10.4 Processamento de blocos em conglomerado.....	17
3.11 Mensuração de Hd e DAPd.....	18

3.12 Análise de dados .....	19
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>20</b>
4.1 Pontos de controle no solo ( <i>Ground control points - GCP</i> ).....	20
4.2 <i>Ground Sample Distance</i> (GSD) gerado nos projetos fotogramétricos com e sem pontos de controle.....	22
4.3 Correlação de Resíduos para DAP e Hc .....	24
4.4 Análise de variância para o erro do DAP (DAPd – DAPc) e altura (Hd – Hc) entre os efeitos e interações.....	25
4.4.1 Efeitos .....	27
4.4.2 Interações .....	30
4.5 Nova Análise de variância para o erro do diâmetro à altura do peito (DAP) e altura comercial (Hc) entre os efeitos e interações sem os GCP .....	32
4.6 Análise de médias do erro para DAPd e Hd .....	34
4.6.1. Efeito entre equipamentos .....	36
4.6.1.1 Diâmetro .....	36
4.6.1.2 Altura comercial.....	37
4.6.2 Efeito época de coleta .....	39
4.6.2.1 Diâmetro .....	39
4.6.2.2 Altura comercial.....	40
4.6.3 Efeito forma de processamento.....	42
4.6.3.1 Diâmetro .....	42
4.6.3.2 Altura comercial.....	43
4.6.4 Interações .....	44
5 CONCLUSÕES .....	46
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

## 1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, os inventários florestais foram projetados para atender às necessidades de informações associadas à extração de madeira. Em muitas nações esses dados são obtidos em parcelas de amostragem para inferir sobre a população (WHITE et al., 2016) sendo estabelecidas de forma circular, retangular ou linear, a forma dependerá dos objetivos do levantamento, variando de 100 m<sup>2</sup> a 800 m<sup>2</sup> (QUEIROZ, 2012).

A altura (H) e o diâmetro à altura do peito (DAP) são os parâmetros mais importantes medidos em um inventário com fins comerciais (MIKITA et al., 2016). Na atualidade, esses dados são obtidos da mesma forma tradicional (indo ao campo, com uma equipe treinada), o que exige mão de obra, custos e tempo. Sendo necessários novos métodos que sejam eficazes e eficientes, e que permitam obter informações detalhadas atualizadas, caracterizando a estrutura e os suplementos da floresta (GROOT et al., 2015; WHITE et al., 2016).

À medida que a demanda por inventários florestais continua a aumentar em um contexto de recursos financeiros reduzidos, as tecnologias de sensoriamento remoto desempenham um papel cada vez mais importante (WHITE et al., 2016).

Atualmente existem diferentes satélites que permitem obter dados relevantes sobre uma floresta; no entanto, quando se requer dados biométricos com boa precisão, é necessário usar outros equipamentos, como o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), porém, o uso desta tecnologia é limitado devido aos altos custos (WALLACE et al., 2011).

As deficiências da coleta de dados de campo de forma tradicional e a necessidade de reduzir os custos do LiDAR incentivaram a aplicação da fotogrametria (IGLHAUT et al., 2019). Que pode ser feita de forma aérea (câmeras no ar) que permite estimar a estrutura de uma população florestal, além de fornecer informações para o mapeamento da vegetação, pastagens e identificar doenças

florestais (WEST, 2015; HENTZ, 2018) e terrestre (com câmeras na mão ou tripé) permite obter informações de objetos até 200 metros (ABER et al., 2010), oferecendo oportunidades de obter dados biométricos, com um custo menor, comparado aos altos custos do TLS(*Terrestrial Laser Scanning*).

A fotogrametria digital vem evoluindo rapidamente nos últimos anos, com disponibilidade de *software* que utilizam algoritmos sofisticados para processamento/extracção de dados (BASTIAN, 2014). Os algoritmos que começam com extração automática de pontos chaves nas imagens, sendo identificados e depois amarrados (correspondidos) entre elas, realiza ajustes de pacote para calcular simultaneamente parâmetros da câmera e uma nuvem de pontos em 3D (IGLHAUT et al., 2019). Permitindo ter ortofotos, modelos em 3D (três dimensões) gerada por uma nuvem de pontos, com boa precisão, altas resolução, trazendo apenas vantagens para o manejo florestal. Porém o interesse das pesquisas na atualidade estão se enfocando no cálculo de variáveis biométrica como DAP em diferentes povoamentos florestais plantados, sendo avaliada em vários estudos como (Panagiotidis et al., 2016; Lian et al., 2014; Mikita et al., 2016; Surový et al., 2016; Liu et al., 2018; Mokroš et al., 2018; Hentz, 2018; Piermatti et al., 2019).

Entretanto, ainda não há estudos relacionados na obtenção de dados como altura comercial, além do DAP, usando esta nova tecnologia.

Por esse motivo, o objetivo deste estudo foi desenvolver uma nova metodologia que permita a obtenção de dados biométricos de forma automatizada como a altura comercial e DAP, por meio da fotogrametria digital, usando os sistemas de aeronaves não tripuladas (UAS), Phantom 4 Pro e Mavic 2 Pro com o fim de subsidiar o inventário florestal. Foram executados projetos fotogramétricos no período com e sem folhas da *Tectona grandis* L.f, processados com pontos de controle e sem pontos de controle no solo, além disso, os blocos foram processados de forma individual e conglomerados no *software Pix4D Mapper*.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Obtenção de dados biométricos da forma tradicional.

No levantamento de dados florestais, quando se trata de plantações para fins comerciais, a determinação do volume é o principal objetivo (CARVALHO et al., 2014). Sendo a altura e o DAP as variáveis a serem medidas, de forma direta ou indiretamente (CURTO et al., 2014).

Na atualidade são usados diferentes equipamentos para medir a altura tais como réguas graduadas, clinômetro Suunto, hipsômetros, entre outros. Segundo Campos e Leite (2009), tem surgido uma nova geração de hipsômetros que contêm dispositivos eletrônicos que aceleram as leituras e permitem a medição de distâncias inclinadas e corrigidas horizontalmente entre o observador e a árvore.

O DAP é tipicamente obtido à altura de 1,30 metros acima do solo, usando diferentes instrumentos, como sutas, fita diamétrica, medidor laser, entre outros. Soares et al. (2006) definem três razões para que o DAP seja de grande importância; a) é uma das características que podem ser facilmente avaliadas em comparação com outra; b) é o principal elemento medido em uma árvore, pois fornece a base para outros cálculos; c) permite calcular a área basal de uma população florestal.

A obtenção dessas variáveis e o uso dos equipamentos estão sujeitos a diferentes erros, definidos três tipos por Soares et al. (2011): a) estatísticas, baseadas no resultado de variações aleatórias das medidas por fatores não controlados, como a presença de correntes de ar para o caso da altura; b) sistemática causada pela falta de calibração dos instrumentos; c) erros grosseiros que são cometidos pelo operador durante a medição ou nos cálculos durante a análise dos dados.

Das duas variáveis comumente utilizadas nos levantamentos florestais os erros na medição do DAP são os mais importantes que na medição da altura; o erro de 1 cm na medição do DAP pode corresponder a 19%, em quanto que 1 metro (m) na

medição da altura total corresponde a 14% no volume de cilindro das mesmas árvores (DO COUTO; BASTOS, 1988).

## **2.2 Sensoriamento remoto aplicado na área florestal**

No último meio século, o sensoriamento remoto se tornou em uma importante fonte de dados para a pesquisa florestal. Entre os sensores usados junto às técnicas de sensoriamento remoto podem ser destacados, as imagens de satélite, a fotogrametria, laser aéreo e terrestre, e atualmente o uso de câmeras embarcadas em sistemas de aeronaves não tripuladas (WHITE et al., 2016), a aplicação dependerá dos objetivos, pois informações com grandes detalhes exigem maior resolução e na maioria dos casos não está disponível (SANQUETTA et al., 2006; HENTZ, 2018).

As imagens geradas pelos satélites permitem obter informações, como: composição, estrutura, volume, crescimento e extensão da floresta (TANG; SHAO, 2015), também têm sido utilizadas em estudos de regeneração, incidência de incêndios, mudanças no clima (SHINZATO, 2015). Porém, essas imagens são caracterizadas por sua resolução espacial (JENSEN, 2009) considerando baixa resolução de 1000 até 100 metros, média de 100 até 10 metros, alta de 10 até 1 metro e muito alta, menos de 1 metro (WHITE et al., 2016; HENTZ, 2018). Muitas vezes se necessita trabalhos mais detalhado, de alta resolução (centimétrica), sendo difícil adquirir por imagens de satélite. Isso permite procurar alternativas, como o uso do *scanner a laser*.

Os *lasers scanner* podem ser de dois tipos: orbital, aéreo (ALS - *Airborne Laser Scanning*) e terrestre (TLS - *Terrestrial Laser Scanning*) (HYYPÄ et al., 2015). Esses sensores emitem um pulso de luz, que é usado para determinar a distância entre o sensor e o objeto.

Os dados do ALS fornecem informações detalhadas da estrutura do dossel da floresta e são altamente adequados para aplicação no inventário florestal (NOORDERMEER et al., 2019), além, de ter demonstrado grande potencial para modelagem, tanto em grandes áreas florestais, parcelas, e em árvores individuais (VAUHKONEN et al., 2014). Salientando, que os métodos baseados em grandes áreas, são os mais considerados e definidos como padrão nos inventários sendo fáceis de integrá-los em parcelas de amostragem (WULDER, 2012; WHITE et al., 2016).

O processamento dos dados gerados pelo TLS, começa com o filtro de pontos feito com base em algoritmos que permitem automatização de classificação dos objetos (ZASADA; RYBSKY, 2013; BALDAUF; GARCIA, 2016) e resulta em uma nuvem de pontos 3D (três dimensões), com precisões sub-métricas, permitindo o uso em engenharia civil, geologia, agronomia, topografia, engenharia florestal e outras áreas do conhecimento (D'OLIVEIRA et al., 2015). Dessa forma, a aquisição de nuvem de pontos em povoamentos florestais constitui uma etapa essencial para obtenção de variáveis dendrométricas tais como: diâmetro, altura e volume individuais de troncos (BUCK et al., 2017). Porém, o uso dessa tecnologia é limitado pelo alto custo, o qual é difícil ser aplicadas em pequenas áreas, sendo viável apenas em uma escala relativamente grande (WALLACE et al., 2011; KOCH, 2013).

### **2.3 Avanços na fotogrametria moderna**

A fotogrametria é definida como a prática de extrair dimensões espaciais de um objeto 3D, capturada em várias imagens, obtidas em diferentes pontos (WALLACE et al., 2016), e têm as bases na fotogrametria métrica e fotogrametria interpretativa, também conhecida como fotointerpretação ou interpretação de imagens (WOLF et al., 2014).

A fotogrametria métrica, além de apresentar a caracterização espectral dos objetos nas imagens, permite obter modelos 3D (CHAVES, 2016), desde que seja possível a aplicação dos princípios da paralaxe em um aparente deslocamento de um objeto observado, causado pela mudança de posicionamento do observador (GRANSHAW, 2016). O desenvolvimento de técnicas de processamento computacional na fotogrametria, permitiu a extração de nuvem de pontos a partir de múltiplas imagens, semelhante à nuvem de pontos geradas anteriormente só pelo LiDAR (DURRIEU et al., 2015).

Com os novos avanços tecnológicos, os UAS têm apresentado muitas vantagens para a fotogrametria, pois permite embarcar diferentes tipos de sensores (HENTZ, 2018). Comparado às técnicas de sensoriamento remoto obtidas pelos satélites, os UAS aparecem como uma alternativa mais viável a ser utilizada pela alta resolução (SOBRINHO et al., 2018).

Para que as imagens sejam de qualidade, é necessário definir a forma de aquisição das fotos, que inclui a orientação interior (sistema de lentes da câmera), e

resolver alguns parâmetros, como distância focal e distorções da lente (WOLF et al., 2014; GRANSHAW, 2016) e orientação externa que consiste em posicionar a imagem no sistema de localização, tratamento de parâmetros como orientação e translação (ANDRADE, 2003).

Além de usar boas câmeras para obter fotografias (MORGAN et al., 2010), é necessário o uso dos pontos de controle no solo (GCP) (HENTZ, 2018). Deve haver pelo menos 4 GCPs com coordenadas 3D e 3 com coordenadas "X e Y", no entanto, quando existem vários blocos, são necessários mais, recomendando que os pontos sejam bem dispersos (WOLF, 2014).

Um ponto importante no planejamento de um projeto fotogramétrico é definir os valores da cobertura longitudinal e lateral. Cobertura longitudinal é a cobertura entre as imagens em uma linha e a cobertura lateral é a cobertura entre duas linhas paralelas (GRANSHAW, 2016). Segundo Wolf et al. (2014), é necessária uma cobertura longitudinal de 60%, permitindo que 20% da área de cada imagem seja visível nas próximas imagens da mesma linha; valores mais baixos são geralmente usados na cobertura lateral, já que é mais importante no sentido de evitar falhas entre as linhas de voo. No entanto, cada situação exigirá um ajuste específico (FIGUEIREDO; FIGUEIREDO, 2018).

As condições climáticas devem ser levadas em consideração na hora de executar um projeto fotogramétrico, uma vez que a presença de nuvens, neblina, chuva, fumaça, não permitem obtenção de imagens de qualidade (WOLF et al., 2014; FIGUEIREDO; FIGUEIREDO, 2018).

## 2.4 Algoritmo usado no processamento de fotos

A fotogrametria digital automatiza geralmente mediante o uso de algoritmo de visão artificial. O algoritmo SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) publicado por Lowe (1999, 2004) é possível extrair características distintas das imagens sendo invariantes a fatores de escalas, translação, rotação, e parcialmente invariante a mudanças de iluminação.

O algoritmo SIFT segue quatro etapas (MENDOÇA, 2016): 1) Detecção e seleção de extremos em um espaço de escala; 2) localização dos pontos chaves; 3) definição da orientação e magnitude dos pontos-chaves; 4) até a criação de um

descritor para pontos-chaves. Esses descritores permitem identificar pontos ou objetos nas fotos (IGLHAUT et al., 2019).

Além do algoritmo SIFT também existem outros algoritmos para a geração da nuvem de pontos sendo discutidos em trabalhos publicados por (MIKOLAJCZYK et al., 2005; CARO, 2012; IGLHAUT et al., 2019).

## 2.5 Uso da fotogrametria digital na área florestal

Os principais benefícios da obtenção de imagens com UAS são contemplados nos baixos custos com equipamentos, facilidade de operação, coleta de dados de alta intensidade (TANG; SHAO, 2015) e alta resolução espacial, menor que 10 cm (FIGUEIREDO; FIGUEIREDO, 2018). Uma das principais características é possuir a IMU (*Inertial Measurement Unit*) que inclui giroscópio, acelerômetros sensores magnéticos ou sensores de pressão (BEARD; MCLAIN, 2012; CHAO; CHEN, 2012), que permite a tomada de fotos em qualquer velocidade e diferentes ângulos.

Diferentes trabalhos têm sido desenvolvidos na área florestal, a fim de acoplar essa tecnologia e realizar trabalhos de forma automatizada, obtendo bons resultados. Destacando alguns como na mensuração de área da copa de *Pinus taeda* L. (FARIN, 2012), inventários florestais em palmáceas (FIGUEIREDO et al., 2018), inventários de sobrevivência em plantios (RUZA et al., 2017; SOBRINHO et al., 2018), estimativa de volume de madeiras em pátios de estocagem (FIGUEIREDO et al., 2016) e o calendário preliminar para inventários (FIGUEIREDO et al., 2018).

No entanto, as pesquisas atuais estão focadas em cálculos de variáveis biométricas em povoamentos com fins comerciais, usando diferentes métodos como fotogrametria terrestre e aérea, destacando trabalhos realizados por Mikita et al. (2016), Hentz (2018) e Iglhaut et al. (2019). Que consiste na comparação de dados obtidos em campo da forma tradicional com os obtidos mediante modelos usando diferentes técnicas de obtenção. Normalmente o diâmetro coletado em campo ( $DAP_C$ ) é obtido em centímetros (cm) e a altura total ou comercial coletada em campo ( $H_C$ ) é registrada em metros (m). Para obter o erro médio na mensuração dessas variáveis, consiste em obter a diferença entre o diâmetro obtidos nos modelos digitais ( $DAP_d$ ) com o  $DAP_c$ . Para obter o erro médio na mensuração da altura comercial, consiste em obter a diferença de altura comercial obtidas pelos modelos digitais ( $H_d$ ) com  $H_c$ .

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Localização e caracterização da área de estudo**

O estudo foi desenvolvido na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em um povoamento de *Tectona grandis* L.f. (Figura 1), com localização central nas coordenadas 10°01'46" S 67°41'12" W com datum WGS 84, no município de Rio Branco, Estado do Acre.



Figura 1. Povoamento de *Tectona grandis* L.f. em período fenológico sem folhas  
Embrapa Acre, 2019. Fonte: Autor (2019).

O povoamento foi plantado em 2006, no espaçamento de 4 x 4 metros, perfazendo uma densidade de 625 indivíduos/ha. Após oito anos, o plantio sofreu dois desbastes, com intervalos de 3 anos entre cada um, totalizando 304 árvores

remanescentes, que foram medidas em dois anos consecutivos, 2013 e 2014, obtendo o diâmetro à altura do peito, altura total, volume e o incremento médio anual.

### **3.2 Atividades prévias para coleta dados**

Na implantação do experimento foi realizada uma desrama das árvores, para ter uma melhor mobilidade do equipamento e assim não ter obstáculos na hora de usar os diferentes tipos de UAS.

Em seguida, cada uma das árvores foi marcada com uma faixa de spray cor vermelha na altura do peito (1,30 m). Essa marca permite maior visualização na nuvem de pontos, gerados durante o processamento por um software específico.

### **3.3 Arranjo experimental.**

Foram estabelecidos 8 blocos de forma aleatória (Figura 2), cada um com uma área de 10 x 10m (100 m<sup>2</sup>), perfazendo um total de 800 m<sup>2</sup>.

Cada bloco foi demarcado com canos de 30 cm de altura, sendo distribuídos nos quatro vértices. Em cada bloco haviam 9 árvores, no entanto, devido aos desbastes feitos em anos anteriores, esse número foi reduzido, ficando 54 árvores distribuídas nos 8 blocos (Tabela 1).

Tabela 1 - Número de árvores por bloco no povoamento de *Tectona grandis* L.f.

	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4	Bloco 5	Bloco 6	Bloco 7	Bloco 8
Número de árvores	6	8	7	7	6	7	6	7

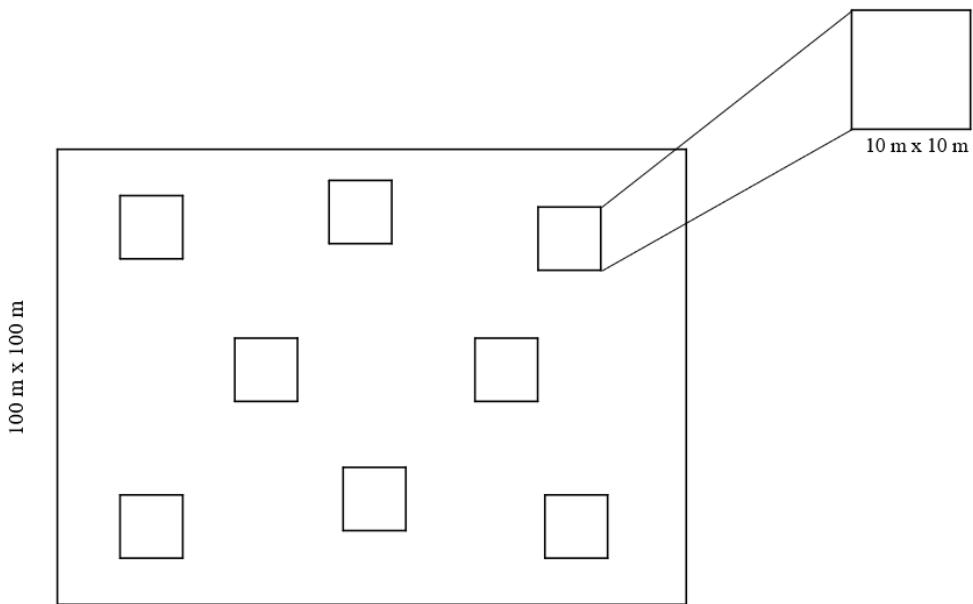


Figura 2. Distribuição de blocos na plantação de *Tectona grandis* L.f. Embrapa Acre, 2019.

### 3.4 Pontos de controle no solo (*Ground control points – GCP*)

Os pontos de controle no solo, são pontos tomados na área de interesse com coordenadas conhecidas. Geralmente são estabelecidos com o propósito de oferecer informações de grande utilidade nos processos de georreferenciamento de objetos espaciais ou fenômenos de interesse de acordo com as necessidades ou especificidades de cada projeto (ABLANEDO et al., 2018).

Para a apropriação das coordenadas geográficas se utilizou três unidades de receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de dupla frequência L1/L2 (Figura 3). Sendo um GNSS usado como base com tempo de apropriação de 4 horas e dois receptores empregados como *hover*, com tempo de apropriação de 15 minutos, distribuídos em cada vértice dos blocos. A base foi posicionada a uma distância de 200 m da unidade *hover*.

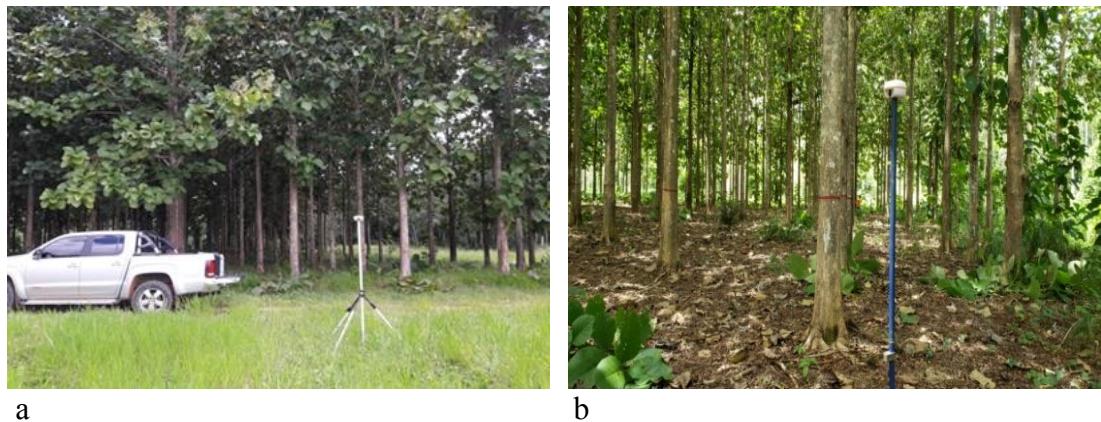


Figura 3. Georreferenciamento com receptor GNSS L1/L2. Em que: a) base e b) hover. Embrapa Acre, 2019.

### 3.5 Coleta de dados de forma direta

Consistiu em medir de forma direta no campo, altura comercial e diâmetro à altura do peito, da maneira tradicional do inventário amostral.

Para obter o DAP foi usada uma suta com graduação milimétrica. A altura comercial foi mensurada utilizando uma vara graduada. Ela foi fixada na base da árvore e depois foi feita a medida até a inserção do primeiro galho.

### 3.6 UAS empregados para coleta de dados

Foram utilizados dois equipamentos da fabricante chinesa DJI (Figura 4), modelos Phantom 4 Pro e Mavic 2 pro para a obtenção das fotos. A escolha dos UAS empregada foi feita em função dos preços acessíveis e sua popularidade no mercado mundial. As características de cada equipamento podem ser visualizadas na Tabela 2.



a

b

Figura 4. Equipamentos usados na obtenção dos projetos fotogramétricos. Em que; a) Phantom 4 Pro; b) Mavic 2 Pro.

Tabela 2. Características dos equipamentos empregados para execução dos projetos fotogramétricos, Rio Branco, Acre, 2019. Fonte DJI (2019).

	Phantom 4 Pro	Mavic 2 Pro
Descrição	Especificação	Especificação
Tamanho da foto	5472 x 3648 pixels	5472 x 3648 pixels
Representação de cores	RGB	RGB
Fabricante da câmera	DJI	Hasselblad
Modelo da câmera	FC6310	L1D-20c
Escala de número f	f/4	f/5
ISSO	ISO 100	ISO 100
Distância focal eq. 35 mm	24 mm	28 mm
Sensor	1"CMOS	1"CMOS
Resolução	20 Megapixels	20 Megapixels
Sistema de geolocalização	GPS/GLONASS	GPS/GLONASS

### 3.7 Coleta de dados com UAS

A aquisição de dados foi feita de forma terrestre, também denominada fotogrametria de curto alcance, concentra-se na reconstrução de fuste de parcelas de amostra ou na reconstrução de árvores individuais (PIERMATTEI et al., 2019).

Para a obtenção das fotos foram empregados UAS devido à característica de possuir um gimbal de três eixos (guinada, inclinação e rotação) dando estabilidade na tomada das fotos, ou seja, ele faz os movimentos de orientação da câmera, sendo

capaz de reduzir as vibrações mantendo um equilíbrio. Não foi usada uma câmera fotográfica profissional porque elas não são acopláveis ao gimbal de três eixos e desta forma não dá estabilidade eletrônica na tomada das fotos.

A obtenção de imagens para cada projeto fotogramétrico foi realizada em dois períodos fenológicos distintos, quando o povoamento estava com e sem folhas.

### **3.7.1 Obtenção de fotos no povoamento de teca com e sem folha**

A primeira coleta foi realizada no mês de maio de 2019. Para obtenção das fotos foram usadas câmeras RGB (*red, green, blue*) dos dois equipamentos testados. A câmera foi configurada com o seguinte padrão: a) uma foto a cada dois segundos; b) ISO 100; c) abertura do diafragma F/3.2; e o *shutter* ajustado no modo automático. Segundo recomendado por Figueiredo et al. (2018) os melhores resultados são alcançados com abertura entre f/2.8 a f/5.6, quanto maior for o número, menor será a abertura do diafragma e menor será quantidade de luz a ser transmitida ao sensor.

Em seguida, foi segurado o UAS à altura do peito com um ângulo horizontal e direcionando a câmera em 90 graus no horizonte. As fotografias foram tomadas em linhas e colunas (Figura 5), com uma velocidade de caminhamento de 2 km/h. Se o caminhamento for maior que essa velocidade, existe a necessidade de configurar novamente a câmera para evitar distorções nas fotos pelo efeito conhecido como *Rolling shutter* (LIANG et al., 2008).

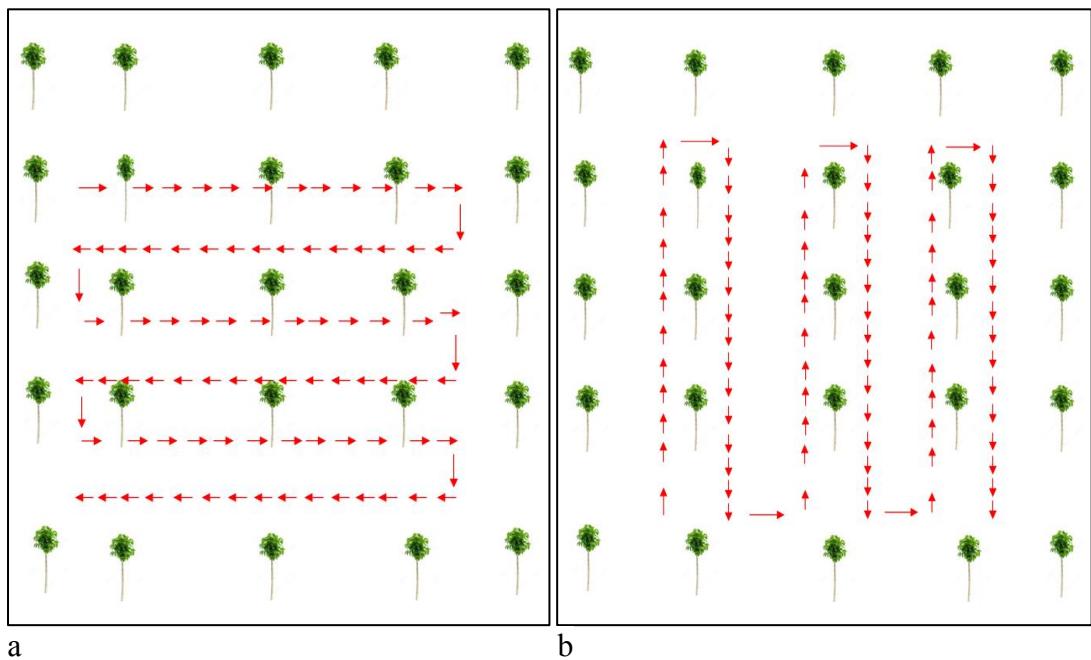


Figura 5. Caminhamento realizado para obtenção das fotos por bloco em que; a) seguindo a fila e b) seguindo as colunas, Rio Branco, Acre, 2019. Fonte: Autor.

A segunda coleta foi realizada no mês de agosto do ano 2019, quando a teca estava no período fenológico sem folhas. Foram usados os mesmos equipamentos, as mesmas configurações e o mesmo caminhamento. Em decorrência da configuração do *shutter* que ficou no modo automático, ocorre um aumento da velocidade do obturador, devido a maior penetração de luz no interior da floresta, em virtude da fase fenológica.

### 3.8 Aplicativo, softwares e hardware empregado

O aplicativo utilizado foi o *Litchi*. Esse aplicativo é amplamente empregado para operar diferentes UAS de forma automatizada. Porém, como nesta pesquisa a operação de coleta de imagens foi realizada de forma terrestre, só foi necessária a configuração da câmera, sendo ajustados o ISO, tempo entre foto, velocidade de caminhamento e *shutter* ficando em modo automático.

O *software* empregado para o processamento das imagens foi o *Pix4D Mapper* versão 4.3.31, e o hardware para processar cada bloco de forma individual foi usado um notebook com processador Intel (R) core (TM) 7-4701MQ, CPU 2.50 GHz,

memória RAM de 32 GB e dupla placa de vídeo NVIDIA Geforce GTX 970M de 8GB. E para o processamento de forma conglomerado, foi usado um *desktop* AMD *Ryzen Threadripper 1900 X8-core Processor*, memória RAM de 128 GB e placa de vídeo NVIDIA Geforce RTX 2070 de 8GB.

### 3.9 Modelo experimental

O modelo considerado no experimento durante o processamento foi,  $Y: B + Eq + Ec + fp + GCP + \varepsilon$ .

Onde  $Y$ : variável de resposta,  $B$ : blocos,  $Eq$ : equipamentos,  $Ec$ : época de coleta considerando os períodos fenológicos,  $fp$ : forma de processamento,  $GCP$ : pontos de controle no solo e  $\varepsilon$ : erros.

O experimento foi desenvolvido como um fatorial  $2^K$  ( $2^4$ ) tendo, dois equipamentos (Phantom 4 Pro, Mavic 2 Pro), duas fases fenológicas de coleta (com e sem folha), duas formas de processamento (individual e conglomerado), e dois métodos de geolocalização (cGCP e sGCP), fazendo uma combinação total de 16 tratamentos, como é demonstrado na Figura 6.

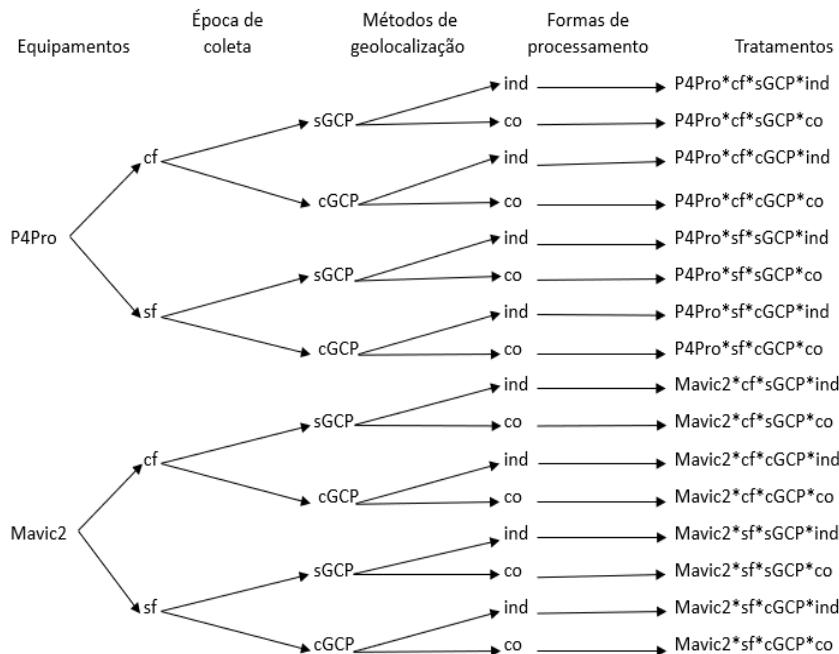


Figura 6. Modelos do experimento com os efeitos e interações. Em que: P4Pro: Phantom 4 Pro, Mavic2: Mavic 2 Pro, cf: com folhas, sf: sem folhas, sGCP: sem pontos de controle no solo, cGCP: com pontos de controle no solo, ind: individual, co: conglomerado.

### **3.10 Processamento de dados**

#### **3.10.1 Processamento dos GCP**

Após a coleta em campo, os dados obtidos com os GNSS (base e *hover*) foram importados para o *software* GTR 2.94. Este é um *software* disponível para processar dados de “Sistemas de Posicionamento Global” (GPS) e “Sistema de Navegação Global por Satélite” (GLONASS), a partir do qual foi possível obter as coordenadas pós-processadas de cada ponto tomado em campo.

#### **3.10.2 Processamento de imagem**

As imagens que apresentaram saturação no balanço de branco foram descartadas do processamento.

O processamento foi feito no *software* *Pix4D Mapper*, baseado em duas etapas: a) processo inicial (*initial processing*), definindo uma escala de imagens para pontos chaves, ótima com emparelhamento de pares de imagens em voos livres ou terrestres, e o número de pontos chaves foi definido em modo automático considerando o modo multiescalar da convolução Gaussiana (JESUS: COSTA, 2015); b) nuvem de pontos e malha 3D (*point cloud and mesh*) com uma densidade de nuvem de pontos em  $\frac{1}{2}$  da escala da imagem, número mínimo de emparelhamento de três imagens com uma resolução alta. A terceira opção de obtenção do modelo digital de superfície (MDS), não foi realizado porque o projeto fotogramétrico não foi para esse fim.

As imagens foram processadas em duas formas de entrada dos dados; a) processamento de cada bloco individualmente; b) em conglomerado vários blocos sendo modelados no mesmo processamento.

#### **3.10.3 Processamento em bloco individual**

Em cada bloco foi obtida uma média de 250 imagens, sendo salvas em um computador em diferentes pastas. Em seguida, as fotos foram processadas de forma individual sem pontos de controle no solo (sGCP), o processamento foi baseado nas imagens obtidas com os UAS. Posteriormente, deu-se continuidade com o

processamento com pontos de controle no solo (cGCP), sendo aderidas no conjunto de imagens de cada projeto fotogramétrico as coordenadas pós-processadas. (Figura 7a). Esta metodologia foi realizada em dois períodos fenológicos do estudo, com e sem folha. (Tabela 3).

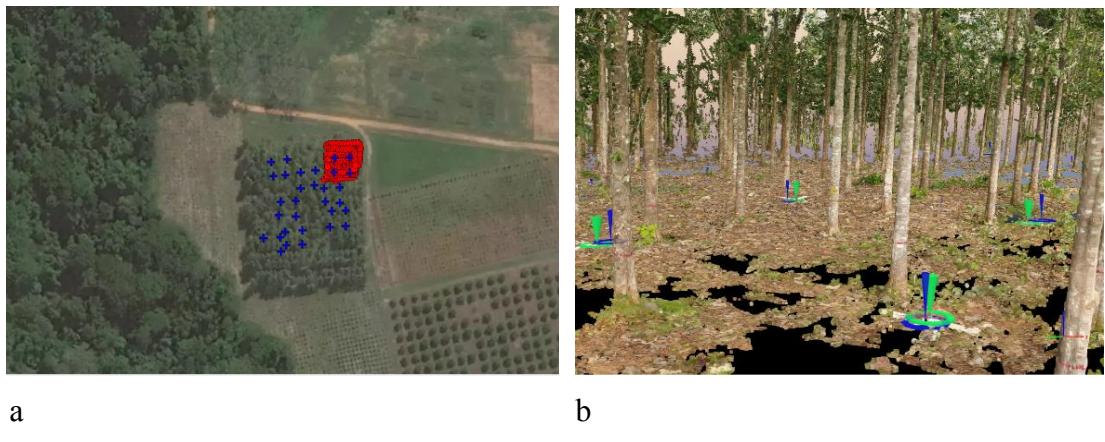


Figura 7. Processamento de bloco individual com pontos de controle. Em que: a) imagem da plantação usando uma cena de satélite, os pontos azuis são cada um dos pontos de controle e a cor vermelha são as fotos tomadas no bloco 1; b) modelo em 3D do mesmo bloco, a linha azul são os pontos de controle no solo e a linha verde é a geolocalização pelas coordenadas do equipamento.

Tabela 3 - Modelos de nuvem de pontos processados dos projetos fotogramétricos por bloco de forma individual de acordo com o número de repetições, Rio Branco, Acre, 2019.

Equipamentos	Época de coleta	Modelos de nuvem de pontos		Totais modelos processados
		cGCP	sGCP	
Phantom 4 Pro	Sem folha	8	8	32
		8	8	
Mavic 2 Pro	Com folha	8	8	32
		8	8	

Em que: sGCP: sem pontos de controle no solo, cGCP: com pontos de controle no solo.

### 3.10. 4 Processamento de blocos em conglomerado

O processamento em conglomerado consistiu em juntar em um só projeto fotogramétrico as imagens obtidas nos blocos individuais, a fim de ter uma maior faixa de visualização da área no modelo 3D.

Foram realizados dois processamentos contendo as imagens dos 8 blocos. O processamento um, teve as imagens do bloco (B), B1, B2, B3, B4, B6 (total de 1250 imagens) e o processamento dois com as fotos do B5, B7, B8 (750 imagens) sGCP. Posteriormente, foi realizado o processamento cGCP seguindo a mesma sequência, sendo aderidas ao *Pix4D Mapper* as coordenadas pós-processadas obtidas pelos GNSS. O mesmo procedimento foi realizado para cada equipamento, nos dois períodos diferentes de coleta (Tabela 4).

Tabela 4 - Modelos de nuvem de pontos processados dos projetos fotogramétricos de blocos em forma conglomerada. Rio Branco, Acre, 2019.

Equipamentos	Época de coleta	Modelos de nuvem de pontos		Totais modelos processados
		cGCP	sGCP	
Phantom 4 Pro	Sem folha	2	2	8
	Mavic 2 Pro	2	2	
Phantom 4 Pro	Com folha	2	2	8
	Mavic 2 Pro	2	2	

Em que: cGCP: sem pontos de controle no solo, sGCP: com pontos de controle no solo.

### 3.11 Mensuração de Hd e DAPd

Para medir o DAPd, primeiro foi feito um corte digital das árvores em ambiente computacional (Figura 8a), ficando só os fustes à altura de 1,30 m acima solo, depois com a ferramenta “nova polilínea” do *Pix4D Mapper*, que funciona como uma trena digital com precisão milimétrica que pode ser operada tanto na horizontal para medir DAPd em centímetros (Figura 8a).

Em seguida foi realizada a mensuração da altura comercial em metros (Figura 8b) com a mesma ferramenta que foi usada para medir o DAPd. No entanto, foi mensurado de forma vertical, desde a base até a inserção do primeiro galho de cada árvore.

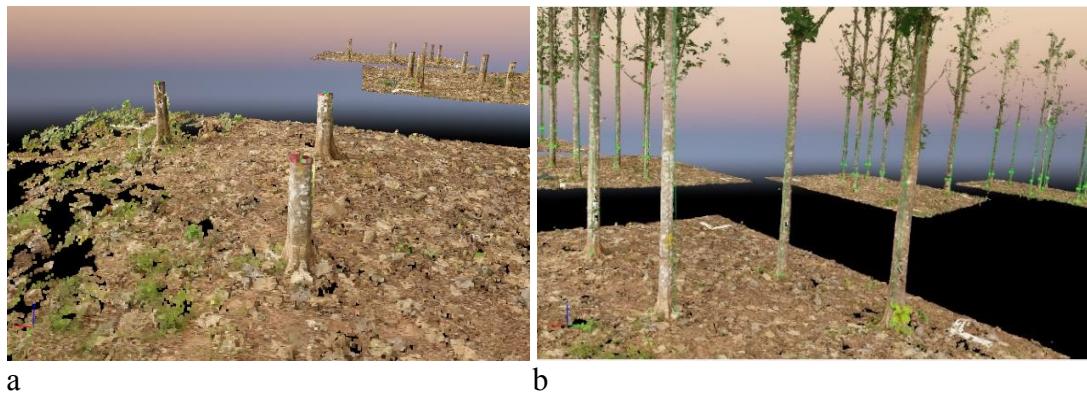


Figura 8. Mensuração de variáveis biométricas em nuvem de pontos, de forma conglomerada, sendo: a) mensuração do DAPd e, b) mensuração da Hd, Rio Branco, Acre, 2019.

### 3.12 Análise de dados

Foi gerado e analisado um modelo estatístico de forma fatorial incluindo os tratamentos com suas respectivas interações, para avaliar os dados obtidos em campo com relação aos obtidos nos modelos. Onde,  $\Sigma$ :  $B + Eq + Ec + GCP + fp + Eq.Ec + Eq.GCP + Eq.Fc + Ec.GCP + Ec.fp + GCP.fp + Eq.GCP.fp + Eq.Ec.GCP + Eq.Ec.fp + Ec.GCP.fp + Eq.Ec.GCP.fp$ . Onde  $\Sigma$ : é o erro, B: blocos, Eq: equipamento, Ec: época de coleta, GCP: pontos de controle no solo, fp: forma de processamento e as interações.

No software *SAS 9.4* foi realizado a análise de correlação dos resíduos para DAPd e DAPc e Hd e Hc, assim como a análise da variância do erro para os tratamentos com as interações. Também foi analisada a média do erro para DAPd e Hd entre os tratamentos e interações pelo teste de Tukey a 5% de significância.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Pontos de controle no solo (*Ground control points - GCP*)

Os resultados do pós-processamento dos pontos de controle podem ser observados na Tabela 5, sendo processados 31 GCP distribuídos nos 8 blocos. Cada ponto de controle foi identificado com a letra “P” que vai desde o ponto número um até o ponto número 31, e a letra “B” identifica cada um dos blocos, desde o bloco um até o bloco 8.

Tabela 5 - Erro médio do pós-processamento dos pontos de controle no solo, Rio Branco, Acre, 2019.

Número do GCP	Erro X (m)	Erro Y (m)	Erro Z (m)
P1B1	0,013	0,017	0,032
P2B1	0,012	0,014	0,028
P3B1	0,013	0,020	0,038
P4B1	0,009	0,010	0,017
P1B2	0,013	0,012	0,022
P2B2	0,033	0,027	0,056
P3B2	0,055	0,051	0,100
P4B2	0,022	0,018	0,044
P1B3	0,019	0,013	0,035
P2B3	0,009	0,006	0,014
P3B3	0,025	0,026	0,069
P4B3	0,027	0,016	0,057
P1B4	0,005	0,004	0,012
P2B4	0,035	0,020	0,077
P3B4	0,033	0,019	0,081
P4B4	0,007	0,004	0,016
P1B5	0,008	0,004	0,021
P2B5	0,009	0,006	0,019
P3B5	0,026	0,012	0,044
P4B5	0,021	0,022	0,041
P1B6	0,010	0,013	0,041
P2B6	0,008	0,010	0,023
P3B6	0,020	0,022	0,061
P4B6	0,015	0,028	0,066
P1B7	0,018	0,009	0,029
P2B7	0,008	0,015	0,070
P3B7	0,022	0,011	0,054
P4B7	0,024	0,017	0,063
P1B8	0,010	0,008	0,016
P2B8	0,023	0,022	0,088
P3B8	0,027	0,024	0,136

Onde: A letra "P" significa o número de cada vértice para obtenção do GCP em cada bloco e a letra "B" significa o número de bloco.

Os pontos de controle têm uma alta precisão que varia de milímetros a centímetros demonstrando uma boa geolocalização de cada bloco com respeito à localização real. Se em um projeto fotogramétrico a resolução espacial ao GSD (*Ground Sample Distance*) é melhor que a obtida no processamento GCPs, poderá ocorrer uma perda de qualidade na nuvem de pontos gerada pelo projeto, visto que os

GCPs com menor precisão acabaram inserindo um erro no modelo gerado. Isso já foi constatado por Figueiredo et al. (2016) na mensuração do volume de toras.

No entanto, quando os valores de precisão dos GCPs são milimétricos e melhores que a resolução do GSD os resultados de mensuração tendem a melhorar, portanto, para o projeto em questão é importante a apropriação de GCPs de alta precisão, principalmente, quando se considera uma pequena distância entre os receptores GNSS “Base” e “*Hover*”, o que eleva as chances de um bom pós-processamento da posição tomada.

#### **4.2 GSD gerado nos projetos fotogramétricos com e sem pontos de controle**

Em um projeto fotogramétrico a escala de fotos é substituída pela distância de amostra do solo (GSD) (NEUMANN, 2008) e o maior GSD possível depende de vários fatores, como o intervalo de exposição da imagem da câmera e o desfoco devido ao movimento da imagem (GRENZDÖRFFER, 2008).

O GSD gerado em cada modelo digital com os diferentes equipamentos processado com GCPs e sGCPs nas distintas fases fenológicas com os distintos UAS, mostram-se na Tabela 6 e Tabela 7. Os resultados foram obtidos mediante o cálculo da média geral dos blocos processados de forma individual (Tabela 6) e de forma conglomerada (Tabela 7). Também se mostra o número de pontos que formava cada modelo do projeto fotogramétrico.

Como o terreno e a imagem raramente são paralelos e a cobertura do solo as vezes é ondulada ou irregular, o GSD não permanece constante em toda a área. (NEUMANN, 2008). Portanto, quanto maior é o GSD em centímetros, menor é a qualidade do modelo, em contrapartida quanto menor o GSD, maior é a qualidade da nuvem de pontos, isto ocorre quando os modelos são processados sem os pontos de controle no solo. Porém, quando o processamento sGCP é menor que o processamento cGCP ocorre um erro de geolocalização nos modelos como é demonstrado na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 - GSD e densidade de pontos médios gerados mediante o processamento individual nos blocos com os diferentes equipamentos nas fases fenológicas do povoamento, Rio Branco, Acre, Brasil, 2019.

<b>Phantom 4 Pro</b>			
	<b>Com folhas</b>		<b>Sem folha</b>
GSD (cm)	sGCP 1,0380 cm	cGCP 1,2025 cm	sGCP 1,1475 cm
Densidade de pontos	14.180.160	14.489.952	12.096.153
<b>Mavic 2 Pro</b>			
GSD	1,0400 cm	1,2150 cm	0,8212 cm
Densidade de pontos	10.523.897	10.240.548	9.444.194

Em que: cm: centímetros, sGCP: sem pontos de controle no solo, cGCP: com pontos de controle no solo, e, GSD: *Ground Sample Distance*.

Apesar que o GSD foi menor no processamento sem pontos de controle que os modelos processados com os pontos de controle no solo usando os dois UAS, eles geraram um erro nos modelos, sendo assim, a nuvem de pontos apresentou menor qualidade com sobreposição de árvores em relação às obtidas nos processamentos cGCP. E o UAS que apresentou maior densidade de pontos nos modelos processados de cada bloco individual, foi o Phantom 4 Pro (Tabela 6), ou seja, os modelos gerados com esse equipamento apresentaram maiores detalhes comparados aos obtidos com a Mavic 2 Pro, mesmo no período com e sem folhas.

Tabela 7 - GSD e densidade de pontos médios gerados mediante o processamento conglomerado nos blocos com os diferentes equipamentos nas fases fenológicas do povoamento, Rio Branco, Acre, Brasil, 2019.

<b>Phantom 4 Pro</b>			
	<b>Com folhas</b>		<b>Sem folha</b>
GSD (cm)	sGCP 0,8025 cm	cGCP 0,8062 cm	sGCP 0,8637 cm
Densidade de pontos	31.359.923	35.009.388	23.194.454
<b>Mavic 2 Pro</b>			
GSD	0,9250	0,91625	0,7925
Densidade de pontos	13.628.081	20.755.971	20.053.343

Em que: cm: centímetros, GCP: sem pontos de controle no solo, cGCP: com pontos de controle no solo, GSD: *Ground Sample Distance*.

Nas duas formas de processamento individual e conglomerado pode se constatar que o GSD obtido no processamento sGCP foi de menor resolução, ou seja

a resolução é baseada em centímetros, e quanto menos centímetros, maior é a resolução. Segundo Figueiredo et al. (2018), quando ocorre um GSD menor que o obtido mediante o processamento cGCP, poderá ocorrer uma perda de qualidade na nuvem de pontos geradas pelo projeto. Isso foi comprovado na nuvem de pontos em alguns modelos, onde algumas árvores estavam sobrepostas umas com as outras. Em contrapartida o GSD obtido durante o processamento cGCP tenha sido de maior resolução nas duas fases de processamento, porém, ele permitiu localizar cada bloco no modelo com respeito à geolocalização real no campo devido à alta precisão.

No entanto a densidade de pontos que formou cada um dos modelos processados de forma conglomerada, usando os diferentes UAS, pode se constatar (Tabela 6) que o Phantom 4 Pro também apresentou a maior densidade, pois os modelos apresentaram maiores detalhes que os obtidos pela Mavic 2 Pro.

#### 4.3 Correlação de Resíduos para DAP e Hc

A correlação dos resíduos fornece um indicativo de quanto uma variável está correlacionada de forma linear com outra (BAUM, 2001). Considerando os dados obtidos de forma direta em campo (DAPc, Hc) com os obtidos de forma nos modelos de forma digital (DAPd, Hd), a correlação dos resíduos é mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 - Correlação parcial dos resíduos entre as variáveis DAPs e altura comercial

Correlação parcial dos resíduos entre as variáveis DAP e altura						
n: 860	DAPd	Hd	DAPc	Hc	EDAP	EH
DAPd	1,0000	0,2462	0,9326	0,1961	0,2742	0,0944
		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0056
Hd	0,2462	1,0000	0,1731	0,7328	0,2181	0,4666
	0,0001		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
DAPc	0,9326	0,1731	1,0000	0,2010	-0,0914	-0,0156
	0,0001	0,0001		0,0001	0,0073	0,6475
Hc	0,1961	0,7328	0,2010	1,0000	0,0057	-0,2599
	0,0001	0,0001	0,0001		0,8668	0,0001
EDAP	0,2742	0,2181	-0,0914	0,0057	1,0000	0,3021
	0,0001	0,0001	0,0073	0,8668		0,0001
EH	0,0944	0,4666	-0,0156	-0,2599	0,3021	1,0000
	0,0056	0,0001	0,6475	0,0001	0,0001	

Em que: DAPd: diâmetro de forma digital, DAPc: diâmetro coletado em campo, Hd: altura de forma digital, Hc: altura em campo, EDAP: erro do diâmetro, EH: erro da altura, n: número de observações.

Como se observa na Tabela 8, existe uma correlação de 0,9326 na mensuração DAPd quando se diz respeito ao DAPc. Essa correlação pode ser explicada pela forma padronizada de obtenção dos dados de forma direta no campo, onde foram mensurados cada árvore com uma suta à mesma altura (1,30 metros) em cada bloco.

Na execução dos projetos fotogramétricos, as fotos também foram obtidas de forma padronizada com o mesmo caminhamento entre linha e coluna, apresentando uma alta sobreposição de uma imagem com outra. Além disso, nos modelos digitais a faixa feita com *spray* vermelho antes da tomada das fotos, permitiu ter uma maior visualização na mensuração do DAPd em cada nuvem de pontos.

A altura comercial apresentou uma correlação de 0,7328 entre Hd em relação à Hc. Quando foi medida nos modelos, estava sujeita a erros, pois não havia referência no campo que permitisse ter um padrão de visualização na nuvem de pontos, como foi feito na mensuração do DAP com *spray* vermelho. Porém, a variação dos resultados foi devido à forma de processamento, onde a forma conglomerada (processamento de várias fotos de diferentes blocos em um só projeto) permitiu desenhar com melhor qualidade a nuvem de pontos que representava as árvores de interesse a serem medidas, além disso, houve maior faixa de visualização dos blocos vizinhos.

Nos modelos processados de forma individual algumas árvores não foram bem desenhadas, principalmente as que se encontravam nos vértices dos blocos já que o número de fotos era menor produzindo um erro maior nos resultados. Bueno et al. (2019), conseguiram obter uma correlação de 0,71, porém, foi para altura total, pois ainda não há trabalhos publicados que permitam estimar a altura comercial de forma automatizada.

#### **4.4 Análise de variância para o erro do DAP (DAPd – DAPc) e altura (Hd – Hc) entre os efeitos e interações**

Nesta análise de variância são considerados os 8 blocos com os quatro tratamentos e as interações (Tabela 9). Se na análise acontece algum efeito anormal ou efeito confundido que alterassem os resultados mediante o teste de significância no tratamento ou interação, seria necessário excluir do modelo. Quando isto acontece a análise não é mais indicativa e deve ser modificada o que indicará fazer outro modelo com uma nova análise de variância

Tabela 9 - Análise de variância para o erro do DAP e altura comercial, entre efeitos e interações com respeito aos valores observados em campo

Efeitos e interações	εDAP					εH				
	G.L	S.Q	Q.M	Valor F	Pr > F	G.L	S.Q	Q.M	Valor F	Pr > F
B	7	84,445	12,064	7,160	0,0001	7	12,308	1,758	4,130	0,0002
Eq	1	87,186	87,186	51,740	0,0001	1	14,388	14,388	33,790	0,0001
Ec	1	3,737	3,737	2,220	0,1368	1	4,347	4,347	10,210	0,0015
GCP	1	77,482	77,482	45,980	0,0001	1	18,091	18,091	42,480	0,0001
f <sub>p</sub>	1	1,030	1,030	0,610	0,4346	1	52,025	52,025	122,170	0,0001
Eq.GCP	1	48,736	48,736	28,920	0,0001	1	0,803	0,803	1,880	0,1702
Eq.f <sub>p</sub>	1	0,100	0,100	0,060	0,8073	1	8,753	8,753	20,560	0,0001
Eq.Ec	1	6,944	6,944	4,120	0,0427	1	5,678	5,678	13,330	0,0003
GCP.f <sub>p</sub>	1	44,840	44,840	26,610	0,0001	1	20,489	20,489	48,120	0,0001
Ec.GCP	1	1,003	1,003	0,600	0,4407	1	0,429	0,429	1,010	0,3157
Ec.f <sub>p</sub>	1	25,698	25,698	15,250	0,0001	1	0,371	0,371	0,870	0,3511
Eq.GCP.f <sub>p</sub>	1	31,278	31,278	18,560	0,0001	1	1,716	1,716	4,030	0,04500
Eq.Ec.GCP	1	3,479	3,479	2,060	0,1511	1	0,191	0,191	0,450	0,5030
Eq.Ec.f <sub>p</sub>	1	24,314	24,314	14,430	0,0002	1	4,742	4,742	11,140	0,0009
Eq.GCP.f <sub>p</sub>	1	6,320	6,320	3,750	0,0531	1	0,085	0,085	0,200	0,6549
Eq.Ec.GCP.f <sub>p</sub>	1	5,750	5,750	3,410	0,0650	1	0,601	0,601	1,410	0,2350

Onde: Pr > F, é a probabilidade a 5 % de significância, pelo teste de Tukey, εDAP: erro médio do diâmetro, εH: erro médio da altura comercial, G.L: graus de liberdade, S.Q: soma dos quadrados, Q.M: quadrado médio, B: blocos, Eq: equipamento, Ec: época de coleta, GCP: pontos de controle no solo, fp: forma de processamento e as interações em todos os tratamentos.

#### 4.4.1 Efeitos

Os blocos apresentaram significância na mensuração do DAPd, obtendo um F calculado de 7,16 e uma probabilidade 0,0001 e na altura comercial o F foi de 4,13 com probabilidade de 0,0002 (Tabela 9). A diferença é explicada pelo número de árvores, pois nem todos os blocos possuíam a mesma quantidade, devido ao desbaste sofrido no povoamento em anos anteriores.

Nos equipamentos também houve diferença significativa na mensuração DAPd, pois o F calculado do erro entre o DAPd e o DAPc, demonstrou haver esta variação e na mensuração da Hd as estatísticas demonstraram a mesma tendência ocorrida com o DAPd (Tabela 9), esses resultados demonstraram que o projeto fotogramétrico com o Phantom 4 Pro apresentou uma maior precisão na mensuração de DAPd e Hd.

Com respeito ao projeto obtido com a Mavic 2 Pro, os resultados foram menos precisos. Isso pode ser explicado pelas características das câmeras dos equipamentos, pois o Phantom 4 Pro têm uma distância focal de 24 milímetros (mm) enquanto a Mavic 2 Pro tem lente de 28 mm. Quanto maior distância focal, menor é o ângulo de visão da lente, com isso menores detalhes são capturados pelas fotos no plano (horizontal), não permitindo modelar bem aqueles objetos que estão num foco panorâmico da foto, desta maneira na geração dos modelos não foram completamente desenhadas as árvores que estavam nas extremidades dos blocos.

A época de coleta não apresentou significância na mensuração do DAPd com relação ao DAPc obtendo um F calculado não significativo (Tabela 9). Isto devido à forma padronizada na obtenção dessa variável nas duas fases fenológicas, permitindo ter um bom desenho dos fustes e minimizando as fontes de variação experimental. A forma padronizada está relacionada à alta sobreposição das imagens tomada dentro do arranjo do projeto fotogramétrico, fazendo com que uma árvore de interesse da parcela apareça em várias imagens, tanto na linha como na coluna durante o caminhamento na execução do projeto.

Alguns trabalhos (LIAN et al., 2014; SUROVÝ et al., 2016; LIU et al., 2018; MOKROŠ et al., 2018; PIERMATTEI et al., 2019) executaram diferentes maneiras de caminhamentos com alta sobreposição de imagens, obtidas tanto em parcelas circulares e outros afastando-se até 3 metros das árvores. Porém, há diferença

significativa na mensuração da Hd com relação ao Hc, tendo um F calculado alto e com alta probabilidade de diferença (Tabela 9). Na obtenção das imagens na época de coleta sem folhas estavam expostas a maior luminosidade e os modelos processados geraram ruídos sendo difícil identificar alguns galhos nas árvores principalmente nos modelos obtidos pela Mavic 2 Pro.

Os ruídos nos modelos foram identificados como uma sobreposição de nuvem de pontos em alguns modelos e perdas em outros, não permitindo identificar alguns galhos que haviam sido mensurados na coleta de forma direta. Além disso, muitas árvores e blocos ficaram sobrepostas umas com as outras em vários modelos de nuvem de pontos (Figura 9) e algumas não foram modeladas, ou seja, não apareceram na nuvem de pontos.



Figura 9. Sobreposição de árvores na nuvem de pontos no período sem folhas.

Com o uso dos GCPs houve diferença significativa na mensuração do DAPd, pois o F calculado do erro entre o DAPc e o DAPd demonstrou haver esta variação e na mensuração de Hd as estatísticas demonstraram a mesma tendência ocorrida na mensuração do DAPd (Tabela 9). Obtendo os menores erros nas mensurações de DAPd e Hd no processamento cGCP tanto para os tratamentos como interações. Os resultados de cada projeto apresentaram uma geolocalização que variou de milímetros a centímetros em cada um dos blocos, o que permitiu localizar cada uma das árvores (Figura 10).

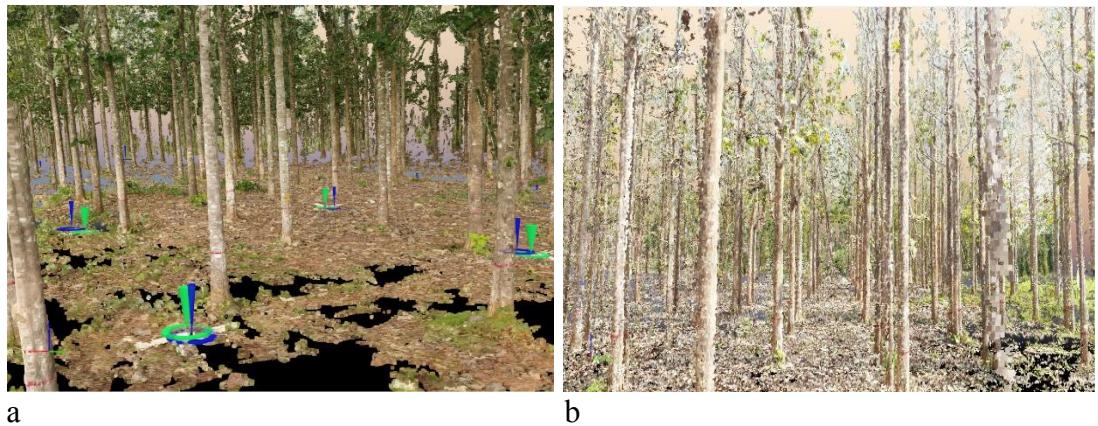


Figura 10. Processamento de projetos fotogramétricos. Em que: a) com pontos de controle no solo e b) sem pontos de controle no solo.

Os projetos com processamento, sGCP apresentaram erros de geolocalização em alguns blocos, pois a apropriação das coordenadas é realizada de maneira direta pelas câmeras no momento exato em que a imagem foi obtida, com isso vários fatores interferem no resultado final da geolocalização; a) o receptor GNSS dos UAS recebem apenas a frequência de código aberto (CA) dos satélites, o que não permite o pós-processamento e correção dos erros posicionais; b) como as coordenadas são apropriadas sob o dossel do povoamento, o posicionamento final da coordenada está mais sujeito a erros de multicaminhos, ou sinais refletidos; e c) a apropriação da coordenada no centroide da foto é realizada com o equipamento em movimento, o que não permite refinar o posicionamento. Portanto, essas falhas são minimizadas usando os GCPs (JAMES; ROBSON, 2014; ELTNER; SCHNEIDER, 2015; HARWIN et al., 2015).

A forma de processamento não apresentou significância para o DAPd em relação ao DAPc obtendo um F calculado não significativo (Tabela 8). Isto se deve à forma padronizada feita na obtenção dessa variável, tanto de forma direta no campo, quanto nos projetos fotogramétricos, com alta sobreposição das imagens entre linha e colunas tomadas no arranjo do projeto fotogramétrico, seguindo o mesmo padrão do caminhamento. Porém, na mensuração da Hd houve diferença significativa em relação à Hc pois o F calculado do erro entre Hc e Hd demonstrou haver essa variação (Tabela 9).

No processamento em conglomerado a nuvem de pontos permitiu ter um melhor desenho dos blocos, havendo maior faixa de visualização nos modelos, isso

foi devido às fotos processadas, foram tomadas em diferentes blocos que se encontravam localizados aleatoriamente no povoamento e as fotos de um bloco permitiram desenhar as partes superiores das árvores dos blocos vizinhos. Porém, no processamento individual a faixa de visualização era menor, já que o número de fotos se limitava só a um bloco, não permitindo ter um modelo completo de várias árvores. Ou seja, algumas árvores não foram modeladas em sua totalidade, desde a base até a copa.

#### **4.4.2 Interações**

Na interação dupla entre equipamento e pontos de controle no solo, os GCP causaram um efeito confundido na mensuração da altura comercial (Tabela 8), e a interação entre época de coleta com os pontos de controle, também aconteceu o mesmo tanto para o DAP e altura comercial. Isso ocorreu devido ao fato que, no processamento cGCP o erro foi menor em relação ao processamento sGCP.

Na interação tripla entre equipamento, época de coleta e pontos de controle no solo (Tabela 9), também ocorreu o efeito confundido produzido pelo GCP, não havendo significância tanto para o DAP como Hd.

A interação quadrupla entre equipamento, época de coleta, pontos de controle no solo, forma de processamento (Tabela 9), não há significância para mensuração do DAPd em relação ao DAPc onde o F calculado do erro não foi significativo, e para Hd em relação Hc o F calculado também apresentou a mesma tendência obtida no DAPd. Isto foi devido ao efeito confundido que causou o processamento cGCP, nas interações o que permitiu uma alteração nos resultados.

Devido ao efeito confundido produzido na análise de variância com o tratamento GCP na mensuração de DAPd e Hd, causando alterações nos resultados de algumas interações. Por isso é necessário excluí-lo do modelo. Porém, sempre vai permanecer no arranjo estatístico como forma padrão.

Desta maneira foi gerado outro novo modelo experimental e avaliado com uma nova análise da variância, avaliando três tratamentos (equipamentos, forma de processamento e época de coleta) e interações. Salientando que o erro médio na mensuração do DAPd cGCP foi de  $-0,09 \pm 0,05$  cm e sGCP  $-0,69 \pm 0,09$  cm e na mensuração da Hd cGCP o erro foi de  $-0,08 \pm 0,03$  metros e sGCP  $-0,37 \pm 0,04$  metros. Sendo demonstrado na a distribuição do erro de forma percentual mediante o

processamento cGCP e SGCP na mensuração do DAPd em relação ao DAPc (Figura 11) e para Hd em comparação a Hc (Figura 12). Desta forma os GCP se constituíram como um padrão obrigatório para executar um projeto fotogramétrico de parcelas de inventário. Segundo Ribeiro et al. (2016), os GCP são importantes pois incrementam a exatidão posicional de um objeto determinado.

Nos gráficos é apresentado a distribuição do erro de forma percentual, em que quanto mais se aproxime a zero, significa que a mensuração do DAPd e Hd tende de ser igual à obtida no campo.

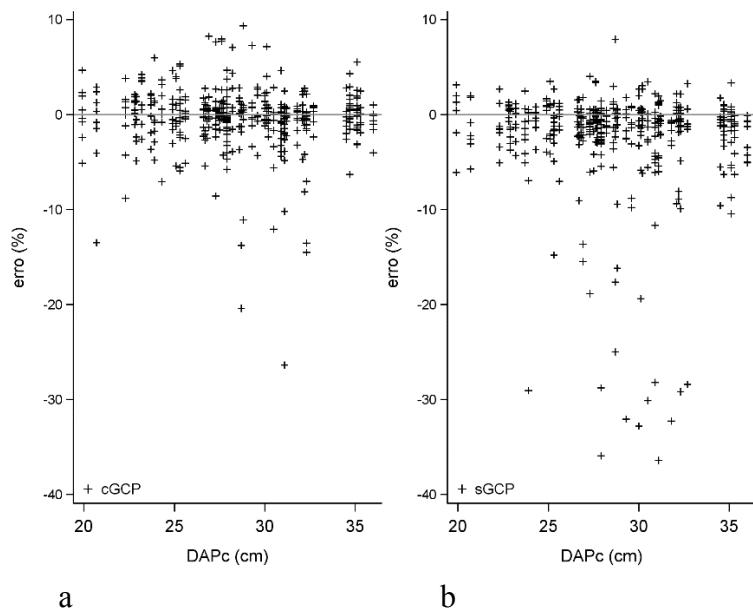


Figura 11. Distribuição do erro percentual na mensuração do DAPd nos modelos processados. Em que: a) cGCP e b) sGCP, em relação dos dados obtidos em campo de forma direta.

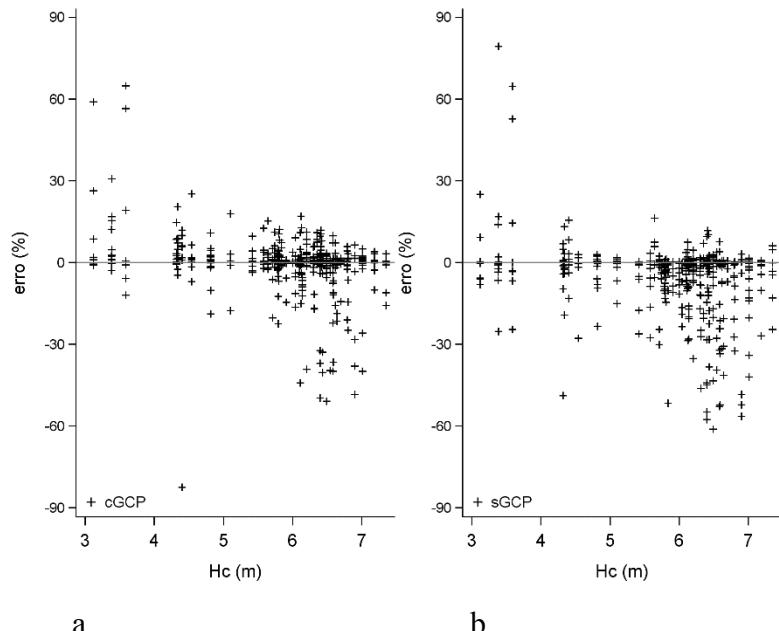


Figura 12. Distribuição do erro percentual na mensuração da altura Hd nos modelos processados. Em que: a) cGCP e b) sGCP, em relação aos dados obtidos em campo de forma direta.

#### 4.5 Nova Análise de variância para o erro do diâmetro à altura do peito (DAP) e altura comercial (Hc) entre os efeitos e interações sem os GCP

A nova análise de variância foi feita com três tratamentos ficando da seguinte maneira:  $\mathcal{E}: B + Eq + Ec + fp + Eq.fp + Eq.Ec + Ec.fp + Eq.Ec.fp$

Em que:  $\mathcal{E}$ : é o erro,  $B$ : blocos,  $Eq$ : equipamento,  $Ec$ : época de coleta,  $fp$ : forma de processamento e as interações em todos os tratamentos. Como é demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Nova análise de variância para o erro do DAP e HC, entre efeitos e interações com respeito aos valores observados em campo de forma direta.

Efeitos e interações	εDAP					εH				
	G.L	S.Q	Q.M	Valor de F	Pr > F	G.L	S.Q	Q.M	Valor de F	Pr > F
B	7	84,45	12,06	6,26	0,0001	7	12,31	1,76	3,73	0,0006
Eq	1	87,19	87,19	45,27	0,0001	1	14,39	14,39	30,52	0,0001
fp	1	1,05	1,05	0,55	0,4596	1	52,03	52,03	110,35	0,0001
Ec	1	3,76	3,76	1,95	0,163	1	4,49	4,49	9,52	0,0021
Eq.fp	1	0,13	0,13	0,07	0,7983	1	8,83	8,83	18,72	0,0001
Eq.Ec	1	7,15	7,15	3,71	0,0544	1	5,74	5,74	12,17	0,0005
Ec.fp	1	26,28	26,28	13,65	0,0002	1	0,40	0,40	0,84	0,3586
Eq.Fc.fp	1	25,07	25,07	13,02	0,0003	1	4,85	4,85	10,28	0,0014

Onde: Pr > F, é a probabilidade a 5% de significância, pelo teste de Tukey, εDAP: erro do diâmetro, εH: erro da altura comercial, G.L: graus de liberdade, S.Q: soma de quadrados, Q.M: quadrado médio, B: blocos, Eq: equipamento, Ec: época de coleta, fp: forma de processamento e as interações entre tratamentos.

Com esta nova análise de variância são analisados os três tratamentos e as interações (Tabela 10). Pode-se constatar que já não existe o efeito confundido como tinha acontecido na primeira análise. Os resultados obtidos com os equipamentos, época de coleta, forma de processamento, seguem a mesma situação análoga ao experimento anterior com quatro fatores.

No entanto na interação tripla, entre equipamento, época de coleta e forma de processamentos apresentaram diferença significativa para mensuração do DAPd e, Hd, com um F calculado de alta precisão (Tabela 10). Pois o Phantom Pro, teve melhores resultados em relação à Mavic 2 Pro, considerando assim as motivações em decorrência das diferenças técnicas entre as câmeras dos dois modelos de UAS testados. A época de coleta influenciou devido ao fato de que em um período havia maior luminosidade que no outro. Ou seja, no período com mais luminosidade vários galhos não foram bem modelados, salientando que a altura foi mensurada no campo considerando a inserção do primeiro galho, porém, no período com folhas a nuvem de pontos apresentou maiores detalhes na modelagem dos galhos. O processamento de cada projeto de forma conglomerada permitiu ter maior faixa de visualização em cada época de coleta em relação à nuvem de pontos obtida de forma individual em cada bloco.

#### **4.6 Análise de médias do erro para DAPd e Hd**

Foram submetidos ao teste de médias os resultados do DAPd e Hd, obtidos na nuvem de pontos em relação aos dados obtidos em campo de forma direta, entre cada tratamento e interações para identificar o erro médio na mensuração de cada projeto fotogramétrico, como é demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 - Teste de médias para diferenças entre equipamentos, época de coleta, forma de processamento e interações do erro para o DAPd e Hd, Rio Branco, Acre, 2019.

Tratamento	n	$\Sigma DAP \pm \Sigma p$ (cm)	$\Sigma H \pm \Sigma p$ (m)	
Efeito singulares				
Eq				
Mavic2	428	-0.71 ± 0.10 b	-0.36 ± 0.04 b	
P4pro	432	-0.07 ± 0.02 a	-0.10 ± 0.03 a	
Ec				
cf	432	-0.32 ± 0.06	-0.16 ± 0.04 a	
sf	428	-0.45 ± 0.08	-0.30 ± 0.04 b	
Fp				
co	432	-0.35 ± 0.06	-0.02 ± 0.02 a	
ind	428	-0.42 ± 0.08	-0.48 ± 0.05 b	
Interações duplas				
Fp.Ec				
co	cf	216	-0.46 ± 0.10 ab	
co	sf	216	-0.25 ± 0.05 a	
ind	cf	216	-0.18 ± 0.07 a	
ind	sf	212	-0.66 ± 0.15 b	
Eq.Ec				
Mavic2	cf	216	-0.55 ± 0.12	
Mavic2	sf	212	-0.87 ± 0.15	
P4pro	cf	216	-0.09 ± 0.04	
P4pro	sf	216	-0.05 ± 0.02	
Eq.Fp				
Mavic2	co	216	-0.66 ± 0.10	
Mavic2	ind	212	-0.76 ± 0.16	
P4pro	co	216	-0.05 ± 0.03	
P4pro	ind	216	-0.09 ± 0.03	
Interação tripla				
Eq.Fp.Ec				
Mavic2	co	cf	108	-0.85 ± 0.19 bc
Mavic2	co	sf	108	-0.47 ± 0.09 ab
Mavic2	ind	cf	108	-0.26 ± 0.13 a
Mavic2	ind	sf	104	-1.27 ± 0.30 c
P4pro	co	cf	108	-0.08 ± 0.07 a
P4pro	co	sf	108	-0.02 ± 0.02 a
P4pro	ind	cf	108	-0.11 ± 0.04 a
P4pro	ind	sf	108	-0.07 ± 0.03 a

Em que: n: número de observações,  $\Sigma DAP$ : erro médio do diâmetro,  $\Sigma H$ : erro médio da altura,  $\Sigma p$ : erro do desvio padrão, Eq: equipamento, P4Pro: Phantom 4 Pro, Mavic2: Mavic 2 Pro, fp: forma de processamento, co: conglomerado, ind: individual, Ec: época de coleta, cf: com folha, sf: sem folha, cm: centímetro, m: metro, \*: medias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente ( $p < 0.05$ ).

## 4.6.1. Efeito entre equipamentos

### 4.6.1.1 Diâmetro

Existe diferença significativa entre os equipamentos para mensuração do DAPd em relação ao DAPc (Tabela 11). Os menores erros obtidos na mensuração do DAPd foram com o Phantom 4 Pro, em relação ao obtido pela Mavic 2 Pro. A variação dos resultados foi devido às características dos equipamentos, e devido a distância focal das câmeras. O sensor da câmera tem influência na reconstrução de objetos e devem ser examinados com maiores detalhes (DANDOIS et al., 2015).

O Phantom 4 Pro tem menor distância focal, ou seja, uma maior amplitude do campo de visão da lente, o que permitiu registrar na foto uma maior quantidade de informação tanto na horizontal como na vertical permitindo a construção de uma nuvem de pontos mais rica em detalhes. As nuvens de pontos obtidas pelos projetos fotogramétricos com a Mavic 2 Pro, não foram bem desenhados, apesar da excelente definição no registro das imagens, porém são mais pobres na geração dos resultados da primeira etapa do processamento do algoritmo SIFT no software *PIX4D Mapper*, isso pode ser observado na análise dos relatórios de qualidade de processamento.

Exemplificando, para a modelagem dos blocos conglomerados B1, B2, B3, B4 e B6, a Mavic 2 Pro alcançou uma média de 74.283 pontos chaves por imagem, enquanto o Phantom 4 Pro obteve uma média de 73.212 pontos chaves, isso é explicado pela melhor definição da imagem gerada pela Mavic 2 Pro. Porém, no processo de *Matching*, para localizar os pontos chaves coincidentes nas imagens vizinhas do projeto fotogramétrico, a Mavic 2 Pro ficou com 3.221,12 coincidências por imagem, enquanto o Phantom P4 Pro conseguiu 4.291,37 coincidências por imagem, essa diferença acarreta na geração de uma nuvem de pontos com 16.081.900 pontos mais rica em detalhes, o que representa um ganho de 84% na densidade da final da nuvem de pontos em favor do Phantom 4 Pro. A restrição da distância focal da Mavic 2 Pro, pode ser tão agravada que até mesmo algumas árvores não apareceram no bloco, isso produziu maior erro na mensuração do DAPd.

Segundo Dandois et al. (2015), os valores também podem variar em função do *hardware* usado, mencionando maior densidade de nuvem de pontos com sensores de maior resolução.

A distribuição do erro na mensuração do DAPd em relação ao DAPc é apresentada de forma percentual (Figura 13), onde pode-se ver com maior claridade que os dados obtidos com o Phantom 4 Pro, tendem se aproximar mais à linha que parte de zero, pois esta apresenta os dados coletados em campo de forma direta, quando isso acontece significa que os resultados obtidos em forma digital têm maior precisão. No entanto com a Mavic 2 Pro, pode-se observar que o erro tende a ser mais amplo afastando-se do zero.

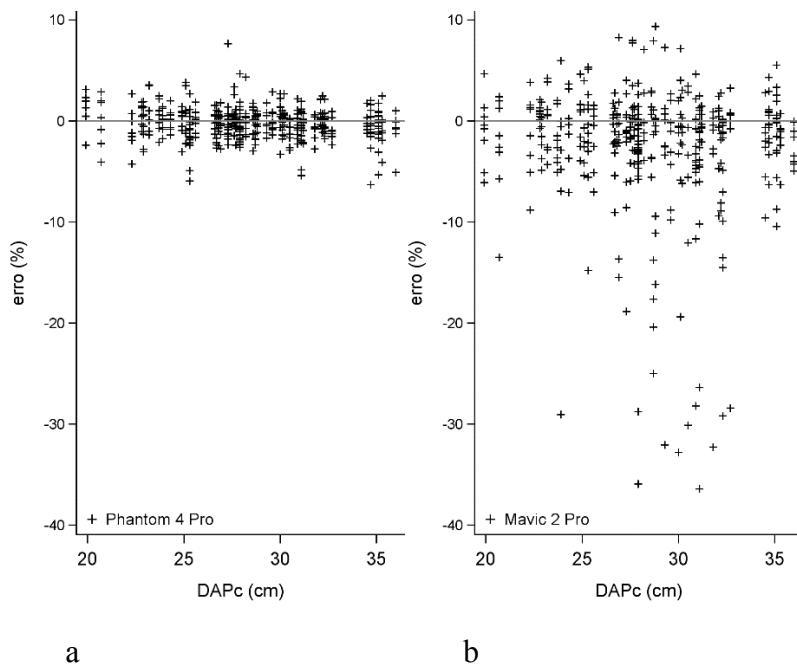


Figura 13. Distribuição do erro percentual na mensuração do DAPd com os diferentes UAS. Em que: a) Phantom 4 Pro e b) Mavic 2 Pro, em relação ao DAPc.

#### 4.6.1.2 Altura comercial

Os equipamentos apresentaram diferença significativa na mensuração de Hd em relação à Hc (Tabela 11). Essa significância foi produto das diferentes características das câmeras dos UAS principalmente à distância focal, como foi discutido na mensuração do DAP, sendo obtido o menor erro nos modelos gerados pelo Phantom 4 Pro (Figura 14), pois com este equipamento a nuvem de pontos gerada apresentou uma maior faixa de visualização tanto dos fustes como das copas das árvores. No entanto, a Mavic 2 Pro, na geração dos modelos, as árvores que

estavam nas extremidades dos blocos, só foram desenhadas por parte do fuste trazendo problemas na mensuração da Hd. Esses resultados também podem ser explicados na mensuração em campo, da mesma maneira que nos modelos, devido aos desafios de observar os topos das árvores, até a inserção do primeiro galho. Esse problema também foi discutido na mensuração de altura total por Bragg (2008), Goetz (2011) e Larjavaara (2013).

Na Figura 14 pode-se ver que a distribuição do erro obtido com o Phantom 4 Pro tende se a aproximar mais a zero, em relação à Mavic 2 Pro. O que significa que ele teve maior precisão nos resultados.

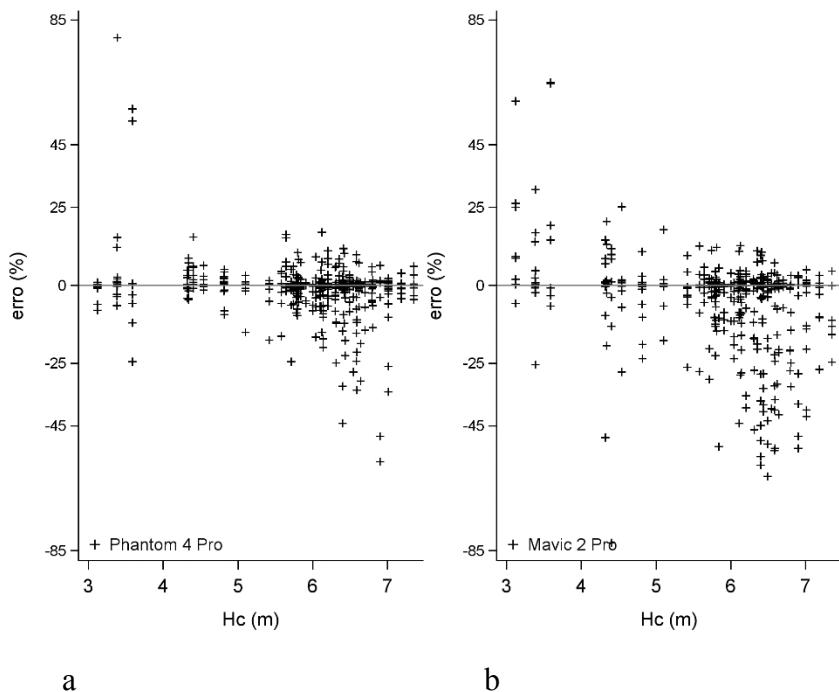


Figura 14. Distribuição do erro percentual na mensuração da altura Hd com os equipamentos. Em que: a) Phantom 4 Pro e b) Mavic 2 Pro, em relação à Hc.

## 4.6.2 Efeito época de coleta

### 4.6.2.1 Diâmetro

Estatisticamente, não apresentou diferença significativa para mensuração do DAPd em relação ao DAPc (Tabela 11). Isto é explicado porque nas duas fases fenológicas (com e sem folhas) a forma de coleta de cada projeto fotogramétrico foi padronizada, fazendo o mesmo caminhamento entre fila e coluna, mesmo tempo na tomada entre fotos de cada projeto fotogramétrico e configuração do ISO, embora, o que mudou foi o *shutter* já que estava em modo automático, apresentando maior luminosidade interna no povoamento no período sem folhas. A sobreposição longitudinal e lateral das imagens influenciam na qualidade e precisão na nuvem de pontos (DANDOIS et al., 2015; RIBEIRO et al., 2016), no entanto nosso estudo à sobreposição lateral e longitudinal foi configurada de igual maneira nas duas fases fenológicas.

Quando foi realizado o processamento em cada período fenológico os modelos apresentaram bons desenhos dos fustes sendo possível medir o DAPd. No entanto, com a Mavic 2 Pro na época de coleta sem folhas no processamento de imagens de forma individual não foram modeladas 4 árvores, isso permitiu um maior índice de erro.

O problema de saturação no balanço de branco ocorre, mas não interfere no registro da imagem, na parte inferior da foto, com isto os problemas de modelagem da base do fuste e seus respectivos DAP não se fazem presentes.

Na Figura 15 é representada a distribuição percentual do erro nas duas fases fenológicas. Pois tanto no período com e sem folha pode-se ver que o erro foi distribuído com a mesma proporção em relação aos dados coletados em campo. Os erros percentuais dos modelos sem folhas tendem a ser até um pouco melhores, pois os sensores dos UAS conseguem registrar mais detalhes da base do fuste. Já a densa folhagem do dossel do povoamento de teca, acaba interferindo na definição da qualidade da foto, quanto se trata da base do fuste.

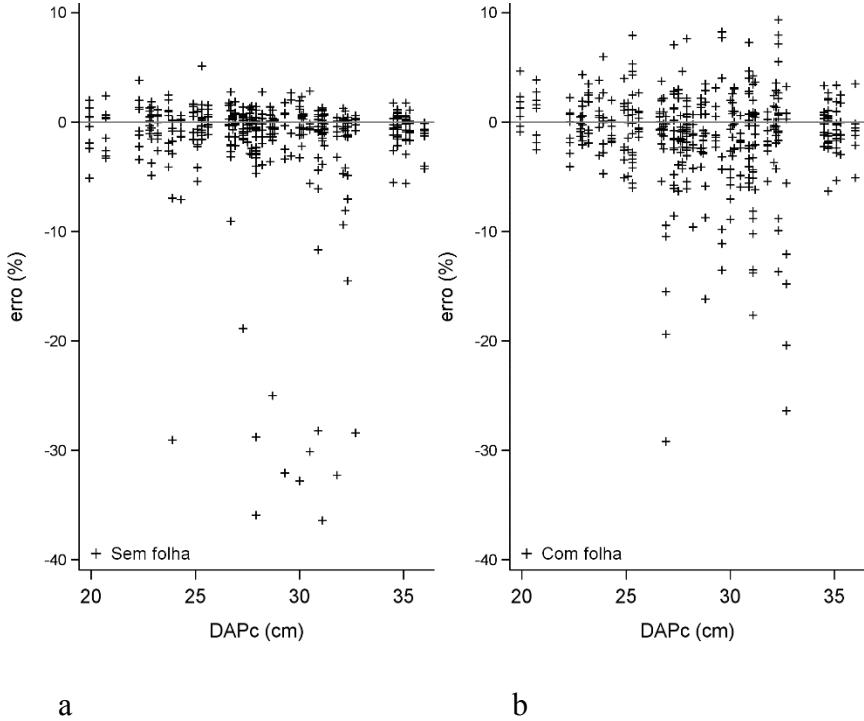


Figura 15. Distribuição percentual do erro na mensuração do DAPd nas diferentes épocas de coleta. Em que: a) sem folhas e b) com folha, em relação ao DAPc.

#### 4.6.2.2 Altura comercial

Estatisticamente houve diferença significativa na mensuração de Hd em relação à Hc (Tabela 11). Embora os projetos fotogramétricos tenham sido obtidos de forma padronizada com o mesmo caminhamento, e tempo entre foto, sempre apresentaram diferenças na nuvem de pontos, devido ao efeito *shutter* que ficou em modo automático já que no período sem folhas havia maior luminosidade interna no povoamento. Na época de coleta com folhas foram obtidos os menores erros, pois os modelos permitiram obter maior visualização dos galhos das árvores devido a menor luminosidade no povoamento (Figura 16a) modelando todas as árvores que foram mensuradas no campo.

No entanto, na época de coleta sem folhas a luminosidade interna do povoamento era maior, tendo interferência no desenho de algumas árvores nos modelos, apresentando perda de pontos na nuvem e sobreposição na nuvem de pontos, principalmente com as fotos obtidas pela Mavic 2 Pro, sendo mais difícil de identificar a inserção do primeiro galho em algumas árvores (Figura 16b).



a

b

Figura 16. Modelos processados em duas fases fenológicas. Em que: a) com folhas e, b) sem folhas.

O excesso de luminosidade faz com que ocorra uma saturação de branco na parte superior da imagem, não permitindo que o algoritmo SIFT localize pontos chaves da imagem no processamento inicial da fotogrametria digital. Mas isso poderia ser amenizado por um ajuste mais adequado dos parâmetros da câmera fotográfica, porém não é uma tarefa simples, pois o projeto fotogramétrico cruzado (linha e colunas) permite que ora se tenha luz adequada, ora se tenha excesso ou falta de dela. Com isso, o ajuste da câmera foi feito da maneira que essas fontes de variação fossem minimizadas. Segundo Dandois et al. (2015) não está claro se configurações diferentes das câmeras podem produzir imagens com contraste apropriado, o mesmo a captura de várias configurações de exposição na mesma área (COX: BOOTH, 2009).

Devido a isso, quatro árvores distribuídas no bloco (B), B2, B3, B6, B7 não foram modeladas, mediante o processamento de imagens de forma individual, isso gerou um maior erro na mensuração da Hd na época sem folhas.

Na figura 17 é representada a distribuição percentual do erro nas duas fases de coleta. No período com folhas foram obtidos os menores erros, pois os modelos permitiram obter maior visualização dos galhos das árvores devido a menor luminosidade no povoamento.

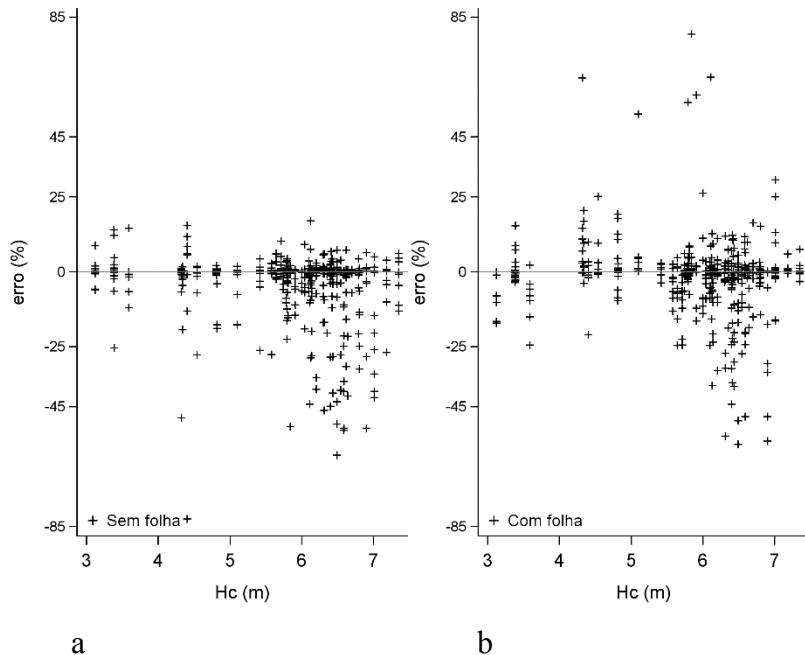


Figura 17. Distribuição do erro percentual na mensuração da Hd nas duas fases fenológica. Em que: a) sem folhas e b) com folhas, em relação à Hc.

#### 4.6.3 Efeito forma de processamento

##### 4.6.3.1 Diâmetro

Na forma de processamento, estatisticamente não houve diferença na mensuração do DAPd em relação ao DAPc (Tabela 11). Os processamentos tanto de forma individual como em conglomerada permitiram modelar os blocos com grandes detalhes, sendo possível medir o DAPd. Além disso, a marca feita em campo para a delimitação do DAP de cada árvore com *Spray* cor vermelha, foi fundamental para padronizar a metodologia e diminuir as fontes de erro na interpretação da nuvem de pontos.

Na figura 18 se mostra a distribuição do erro percentual obtido nas duas formas de processamento na mensuração do DAPd em relação aos dados obtidos em campo. Aqui a distribuição é muito semelhante com uma tendência um pouco melhor para o processamento em conglomerado.

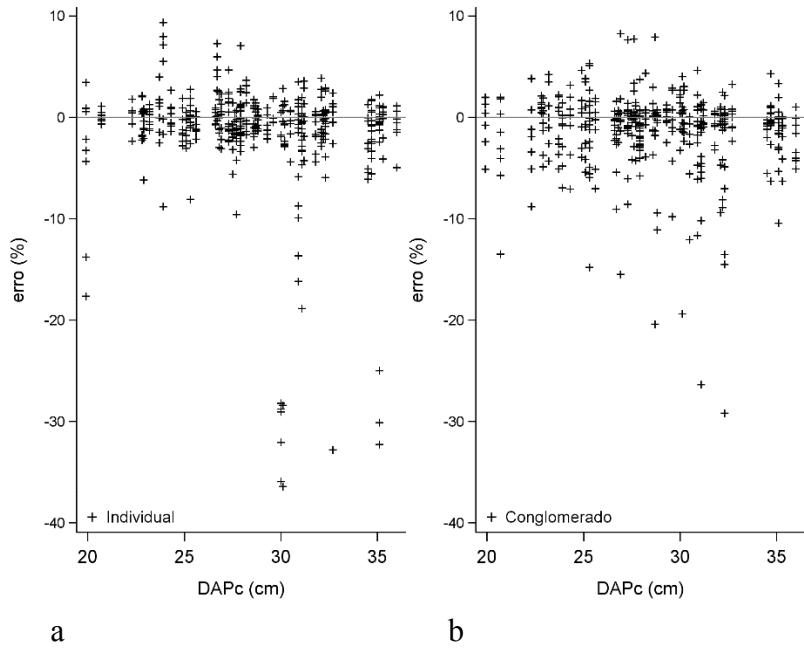


Figura 18. Distribuição do erro percentual na mensuração do DAPd na forma de processamento. Em que: a) individual e b) conglomerado, em relação ao DAPc.

#### 4.6.3.2 Altura comercial

Nas diferentes formas de processamento, houve diferença significância na mensuração de Hd em relação à Hc (Tabela 11). Os menores erros foram obtidos mediante o processamento em conglomerado (Figura 18) isso se deve as características já comentadas anteriormente, ou seja, luz adequada e grande quantidade de fotos das árvores de interesse, permitem um processamento de projeto com alto *overlap* de imagens, tanto no eixo do horizonte do povoamento (X), quanto no eixo vertical no sentido da copa (Y). Os modelos gerados permitiram que as fotos de um bloco pudessem modelar as árvores dos outros blocos vizinhos, desta forma foi possível ter uma maior faixa de visualização desde a base até a copa das árvores, sendo modelados todas as árvores que haviam nos blocos testemunhas.

No entanto, no processamento individual algumas árvores que estavam nas extremidades dos blocos não foram bem desenhadas impossibilitando obter a altura até o primeiro galho. Isto aconteceu principalmente na fase fenológica sem folhas, apresentando os maiores erros na mensuração desta variável. Além disso, no

processamento individual com as fotos obtidas pela Mavic 2 Pro na época de coleta sem folhas, nos foram modeladas quatro árvores, como foi anteriormente discutido.

Na Figura 19 pode-se constatar que o processamento de forma conglomerada permitiu modelar as árvores com maiores detalhes, isto permitiu ter um menor erro na mensuração da Hd.

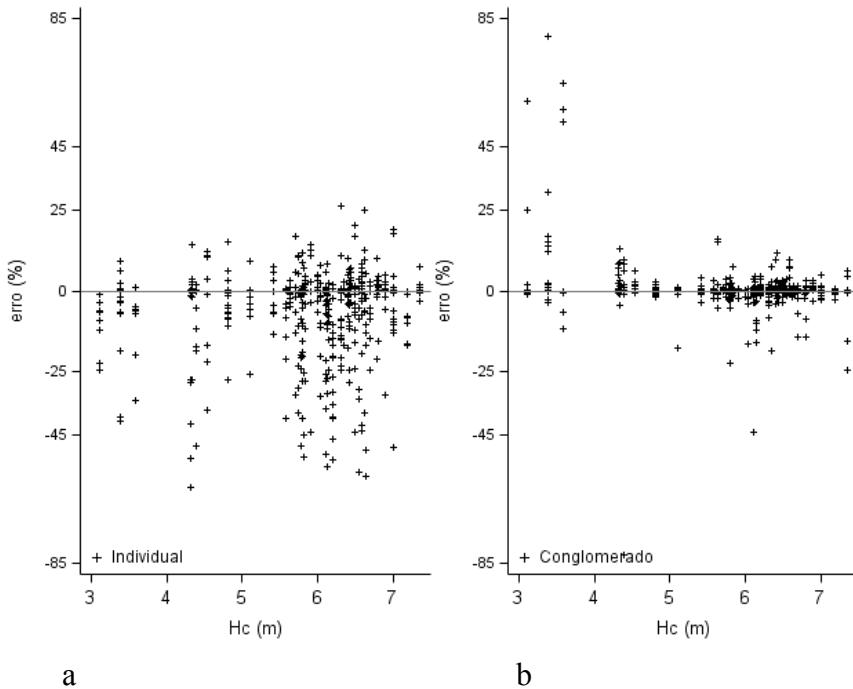


Figura 19. Distribuição do erro percentual na mensuração Hd. Em que: a) de forma individual e b) em conglomerado, em relação à Hc.

#### 4.6.4 Interações

Nas interações duplas (Tabela 11) entre forma de processamento e época de coleta os menores erros, tanto quanto para DAPd e Hd foram mediante o processamento em conglomerado no período fenológico com folhas. E a interação, equipamento com época de coleta, o menor erro obtido com o Phantom 4 Pro no período fenológico com folhas. Em seguida a interação entre equipamento e forma de processamento, o menor erro foi com o Phantom 4 Pro, no processamento em conglomerado.

Para constatar a melhor forma de obter os dados biométricos, foi feita a interação tripla, onde os resultados demonstraram haver menores erros nas mensurações tanto quanto para DAPd e Hd, usando o Phantom 4 Pro, obtendo os

projetos fotogramétricos no período com folhas e sendo processados de forma em conglomerado (Tabela 11).

Salientando que na época de coleta sem folhas, os modelos apresentaram boa qualidade mediante o processamento em conglomerado. No entanto, na hora de mensuração da Hd, a sobreposição e perda de pontos na nuvem, não permitiu desenhar alguns galhos devido à luminosidade.

## 5 CONCLUSÕES

A fotogrametria é uma ferramenta viável para obtenção de dados biométricos como, altura comercial e diâmetro, à altura do peito de forma automatizada, subsidiando os inventários de povoamentos florestais.

Os pontos de controle no solo devem ser considerados padrões para obter resultados de maior precisão em projetos fotogramétricos, pois eles permitem ter uma boa geolocalização de um objeto quando se trata da posição real, auxiliando na melhor precisão das estimativas.

Para realizar projetos fotogramétricos tem que se levar em consideração a distância focal das câmeras, pois, as que apresentam maior distância tendem a obter menores detalhes nas fotos no plano horizontal. O melhor projeto fotogramétrico foi obtido com o Phantom 4 Pro.

A melhor forma de processar os projetos fotogramétricos é de forma conglomerada, pois há uma maior visualização dos fustes e copas das árvores.

No momento de executar um projeto fotogramétrico, tem que se levar em consideração a fase fenológica do povoamento quando o propósito é medir a altura comercial, pois a luminosidade interna influencia negativamente, fazendo que alguns galhos não sejam bem modelados na nuvem de pontos. Nessas circunstâncias deve-se executar o projeto fotogramétrico no período com folhas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABER, J. S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. B. **Small-format aerial photography: Principles, techniques and geosciences applications.** Boston: ELSEVIER, 2010. 266 p.
- ABLANEDO, E. S.; CHANDLER, J. H.; PÉREZ, J. R. R.; ORDOÑEZ, C. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SFM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. **Remote sensing**, v. 10, n. 10, p. 2-19, 2018.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria.** 2 ed. Curitiba: SBEE, 2003, 255 p.
- BALDAUF, T.; GARCIA, M. Image processing of radar and lidar in tropical forestry. **Tropical Forestry Handbook.** Springer, Berlin, Heidelberg, 2016. p. 635-661.
- BASTIAN, A. **Análise comparativa entre os programas para restituição fotogramétrica photomodeler e orthowre.** III seminário internacional sobre documentação do patrimônio arquitetônico com o uso de tecnologias digitais. João Pessoa. PB, 2014. p.119-129.
- BAUM, C. F. Residual diagnostics for cross-section time series regression models. **The Stata Journal**, n.1, p. 101-104. 2001.
- BEARD, R. W.; MCLAIN, T. W. **Small Unmanned Aircraft:** theory and practice. Princeton: Princeton University Press, 2012, 299 p.
- BRAGG, D. C. Na Improved Tree Height Measurement Technique Tested on Mature Souther Pines. Sourhern Jornal Of Applied Forestry, v. 32, n.1, p. 38-43, 2008.
- BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; MACHADO, Á. M. L.; NETTO, S. P. Detecção de árvores em nuvens de pontos de varredura laser terrestre. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, p. 21-38, 2017.
- BUENO, J. O. A.; BOURSHEIDT, V.; PEZZOPANE, J. R. M.; MERNARDI, A. C. C.; CRESTANA, S. **Metodología para estimar altura de árboles com base em imagens aéreas capturadas por drone.** In: Embrapa Instrumentação-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. Anais. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019, 764 p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas.** 3.ed. rev. e ampl.. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009, 548p.
- CARO, J. L. H. **Fotogrametría modelado 3D:** un caso práctico para la difusión del patrimonio y su promoción turística. IX Congreso Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. TURITEC 2012, p. 1-15, 2012.
- CARVALHO, M. M.; ROSA, M. M.; LIMA, G. C. P.; KOEHLER, H. S.; SILVESTRE, R.; NAPPO, S. M. **Comparação de métodos de cubagem na determinação do volume de árvores de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus***

- grandis*.** In: CORTE, A. P. D. [et al.]. Atualidades em Mensuração Florestal. Curitiba: ed. 1., p. 50-54, 2014.
- CHAO, H.; CHEN, Y. **Remote Sensing and actuatiom using unmanned vehicles.** Hoboken, NJ, USA: Joh wiley & Sons, Inc, 2012, 206 p.
- CHAVES, A. G. S. **Modelagem tridimensional (3D) de fustes e toras comerciais de *Tectona grandis* L.F.** 2016. 32 p. Especialização (Manejo Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 2016.
- COX, S. E.; BOOTH, D. T. Shadow attenuation with high dynamic range images. **Environmental monitoring and assessment**, v. 158, n. 1-4, p. 231, 2009.
- CURTO, R. D. A.; MÔRAZ, R.; SILVA, G. F.; NETTO, S. P. **Análise descritiva de uma Floresta Estacional Semidecidual com base nas classes de altura de árvores.** In: CORTE, A. P. D. Atualidades em Mensuração Florestal. Curitiba: ed. 1., p. 14-17. 2014.
- DANDOIS, J. O.; OLANO, M.; ELLIS, E. C. Optimal altitude, overlap, and wather conditions for computer vision uav estimates of forest struture. **Remote sensing**, v.7, n. 10, p. 13895-13920, 2015.
- DJI. **Mavic 2 Pro.** Disponível em: <<<https://www.dji.com/br/search?q=Mavic%202%20pro>>>. Acesso em: 27 de Nov. 2019>>.
- DJI. **Phantom 4 Pro.** Disponível em: <<<https://www.dji.com/phantom-4-pro/info#specs>>>. Acesso em: 20 de Sep. 2019.
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. A. **Uso do LIDAR como Ferramenta para o Manejo de Precisão em Florestas Tropicais.** Rio Branco: Embrapa, 150 p. 2015.
- DO COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. G. **Erros de medição de altura em povoamentos de Eucalyptus em região plana.** IPEF - I Instituto De Pesquisa e Estudos Florestais. nº 39, 1988, p. 21-37. Disponivel em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr39/cap03.pdf>. Acesso: 20 outubre de 2019.
- DURRIEU, S. Optical Remote Sensing of Tree and Stand Heights. In: THENKABAIL, P.S (Ed.) **Land Recources Monitoring, Modeling, and Mapping With Remote Sensing.** Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 449-485.
- ELTNER, A.; SCHNEIDER, D. Analysis of diferente methods for 3D reconstruction of natural surfaces from parallel-axes UAV images. **ThePhotogrammetric Record**, v. 30, n. 151, p. 279-299, 2015.
- FARIN, J. A. S. **Uso do veículo aéreo não tripulado microdrone md4-1000 na obtenção de fotografias aéreas de um povoamento de *Pinus taeda* L.** 2012. 48 f. Monografia de Especialização - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- FIGUEIREDO, E. O.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; LOCKS, C. J.; PAPA, D. A. **Estimativa do Volume de Madeira em Pátios de Estocagem de Toras por meio de Câmeras RGB Instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP).** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Rio Branco: Embrapa Acre, 2016.
- FIGUEIREDO, E. O.; FIGUEIREDO, S. M. M. **Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3.** Rio Branco: Embrapa Acre, 2018.
- FIGUEIREDO, E. O.; FIGUEIREDO, S. M. M.; OLIVEIRA, M. V. N. **Inventário florestal de palmáceas na Amazônia com o emprego de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA).** In: Simpósio Brasileiro de Pós-Graduação em Ciências Florestais, 2018, Natal -RN. X Simpósio Brasileiro de Pós-Graduação

- em Ciências Florestais, 2018. v.1 p. 622-626.
- FIGUEIREDO, E. O.; FIGUEIREDO, S. M. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; SANTOS, E. K. M. dos. **Manejo Florestal 4.0: Calendário Preliminar de Inventário Florestal com Aeronaves Remotamente Pilotadas**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2018.
- GOETZ, S.; DUBAYAH, R. Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change. **Carbon Manag**, v. 2, n. 3, p. 231-244, 2011.
- GRANSHAW, S. I. **Photogrammetric Terminology**: Third Edition. Photogrammetric Record, v. 31, n. 154, p. 210-252, 2016.
- GRENZDÖRFFER, G. J. Medium format digital cameras-a EuroSDR project. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, V. 37 p. 1043-1050, 2008.
- GROOT, A.; CORTINI, F.; WULDER, M. A. Crown-fibre attribute relationships for enhanced forest inventory: Progress and prospects. **The Forestry Chronicle**, v. 91, n. 3, p. 266-279, 2015.
- HARWIN, S.; LUCIEER, A.; OSBORN, J.; The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. **Remote sensing**, v. 6, n. 9, p. 11933-11953, 2015.
- HENTZ, Â. M. K. **Obtenção de informações dendrométricas para inventário florestal automatizado por meio de veículos aéreos não tripulados (VANT)**. 2018. 238 f. Tese (Doutorado em Ciência florestal) - Universidade Federal do Paraná. 2018.
- HYYPPÄ, J.; KARJALAINEN, M.; LIANG, X.; JAAKKOLA, A.; YU, X.; WULDER, M.; KAARTINEN, H. Remote sensing of forests from Lidar and Radar. **Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing**; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, p. 397-427, 2015.
- IGLHAUT, J.; CABO, C.; PULITI, S.; PIERMATTEI, L.; O'CONNOR, J.; ROSETTE, J. Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. **Current Forestry Reports**, v. 5, n. 3, p. 155-168, 2019.
- JAMES, M. R.; ROBSON, S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, n. 10, p. 1413-1420, 2014.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2a Edição traduzida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. São Paulo, Parêntese, 2009, 672 p.
- JESUS, E. O.; COSTA J. R. **A utilização de filtros gaussianos na análise de imagens digitais**. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics v. 3, n.1, p.1-7, 2015.
- KOCH, B. Remote sensing supporting national forest inventories NFA. FAO knowledge reference for national forest assessments, v. 15, 2013, 143 p.
- LIANG, C. K.; CHANG, L. W.; CHEN, H. H. Analysis and Compensation of Rolling Shutter Effect. **IEEE Transactions on Image Processing**, vol. 17, n.8, p. 1323-1330, Aug. 2008.
- LIANG, X.; JAAKKOLA, A.; WANG, Y.; HYYPPÄ, J.; HONKAVAARA, E.; LIU, J.; KAARTINEN, H. The use of a hand-held camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots. **Remote Sens**, v. 6, n. 7, p. 6587-603, 2014.
- LIU, J.; FENG, Z.; YANG, L.; MANNAN, A.; KHAN, T.; ZHAO, Z.; CHENG, Z. Extraction of sample plot parameters from 3D point cloud reconstruction based on combined RTK and CCD continuous photography. **Remote Sensing**, v. 10,

- n. 8, p. 1-22, 2018.
- LOWE, D. G. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. In **iccv**, v. 99, n. 2, p. 1150-1157,1999.
- LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International journal of computer vision**, v. 60, n. 2, p. 91-110, 2004.
- LARJAVAARA, M.; HELENE, C. L. Measuring tree height: a quantitave comparison of two common field methods in a moist tropical forest. **Methods in Ecology and Evolution**, v.4, n.9, p. 793-801, 2013.
- MENDOÇA, G. Q. **Descriptor local baseado no algoritmo SIFT para rastreamento e segmentação de objetos em vídeos via grafos de regiões**. 2016. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- MIKITA, T.; JANATA, P.; SUROVÝ, P. Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. **Forests**, v. 7, n. 8, p. 1-14, 2016.
- MIKOLAJCZYK, K.; TUYTELLARS, T.; SCHMID, C.; ZISSEMAN, A.; MATAS, J.; SCHAFFALIRZKY, F.; KADIR, T.; VAN, T. A comparison of affine region detectors. **International journal of computer vision**, v. 65, n. 2, p. 43-72, 2005.
- MOKROŠ, M.; LIANG, X.; SUROVÝ, P.; VALENT, P.; ČERŇAVA, J.; CHUDÝ, F.; MERGANIČ, J. Evaluation of close-range photogrammetry image collection methods for estimating tree diameters. **ISPRS Int. J. Geo- inf**, v. 7, n. 3, p. 1-13, 2018.
- MORGAN, J. L.; GERCEL, S. E.; COOPS, N. C. Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management. **BioScience**, v. 60, n.1,p. 47-59. 2010.
- NEUMANN, K. J. Trends for digital aerial mapping cameras. The International Archives of the Potogrammetry. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2008, p. 551-554.
- NOORDERMEER, L.; BOLLANDSÅS, O, M.; ØRKA, H, O.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Comparing the accuracies of forest attrinutes predicted from airborne lasers scanning and digital aerial photogrammetry in operational forest inventories. **Remote Sensing of Environment**, v. 226 p. 26-37. 2019.
- PANAGIOTIDIS, D.; SUROVÝ, P.; KUŽELKA, K. Accuracy of Structure from Motion models in comparison with terrestrial laser scanner for the analysis of DBH and height influence on error behaviour. **Journal of Forest Science**, v. 62, p. 357-365, 2016.
- PIERMATTEI, L.; KAREL, W.; WANG, D.; WIESER, M.; MOKROŠ, M.; KOREŇ, M.; TOMASTIK, J.; PFEIFER, N. Terrestrial Structure from Motion photogrammetry for deriving forest inventory data. **Remote Sensing**, v. 11, n.8, p.1-23, 2019.
- QUEIROZ, W. T. **Amostragem em inventário florestal**. Belém, Universidade Rural do Amazônia, 2012, 441p.
- RIBEIRO, M.; DA SILVA, L.; ESTANQUEIRO, R.; TENEDÓIRO, J. A. P. **Variação da sobreposição longitudinal e lateral entre imagens obtidas por UAV e utilização de GCP na melhoria da qualidade dos dados**. I Seminário Internacional UAV, 2016, 152-161 p.
- RUZA, M. S.; CORTE, A. P.; HENTZ, A. M. K.; SANQUETTA, C. R.; SILVA, C. A.; SCHOENINGER, E. R. Inventário de Sobrevivência de povoamento de

- Eucalyptus com uso de Redes Neurais Artificiais em Fotografias obtidas por VANTs. **Advances in Forestry Sciencie**, v. 4, n. 1, p. 83-88, 2017.
- SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; CORTE, A. P. D Inventários Florestais: planejamento e execução. Curitiba (Brasil), 2006. 270 p.
- SHINZATO, E. T. **Integração de dados laser scanner aerotransportado e imagens aéreas no inventário florestal para a estimativa volumétrica de madeira**. 2015. 84 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, San José dos Campos.
- SOARES, C. P. B.; PAULA, F. N.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 276 p.
- SOARES, C. P. B.; PAULA , F. N.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2<sup>a</sup> ed. Viçosa: Editora UFV, 2011. 272 P.
- SOBRINHO, M. F. D.; CORTE, A. P. D.; VASCONCELLOS, B. N.; SANQUETTA, C. R.; REX, F. E. Uso de Veículos aéreos não tripulados (Vant) para mensuração de processos florestais. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.15 n. 27, p. 118, 2018.
- SUROVÝ, P.; YOSHIMOTO, A.; PANAGIOTIDIS, D. Accuracy of reconstruction of the tree stem surface using terrestrial close-range photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 1-13, 2016.
- TANG, L.; SHAO, G. Drone remote sensing for forestry research and practices. **Journal of Forestry Research**, v. 26, n. 4, p. 791-797, 2015.
- VAUHKONEN, J.; MALTAMO, M.; MCROBERTS, R. E.; NÆSSET, E. **Introduction to forestry applications of airborne laser scanning**. In: Forestry applications of airborne laser scanning. Springer, Managing Forest Ecosystems, v. 27, p. 1-16. 2014.
- WALLACE, L.; LUCIEER, A.; TURNER, D.; WATSON, C. **Error assessment and mitigation for hyper-temporal UAV-borne LiDAR surveys of forest inventory**. Proceedings of Silvilaser, Hobart, 2011.
- WALLACE, L.; LUCIEER, A.; MALENOVSKY, Z.; TURNER, D. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. **Forests**, v. 7, n. 3, p. 62, 2016.
- WEST, P. W. **Tree and forest Measurement**. New york, 3rd ed: Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015, 190 p.
- WHITE, J. C.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; VASTARANTE, M.; HILKER, T.; TOMPALSKI, P. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 619-641, 2016.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; BON, A. **Elements of photogrammetry with applocation in GIS**. New york: McGraw-Hill, 2014, 608p.
- WULDER, M.; GOBAKKEN, T. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 121, p. 196-209, 2012.
- ZASADA, M.; RYBSKY, A. Horizon visibility and accuracy of stocking determination on circular sample plots using automated remote measurement techniques. **Forest ecology and management**, v. 302, p. 171-177, 2013.