

STHÉFANY CAROLINA DE MELO NOBRE

QUANTIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM
PLANTIOS EXPERIMENTAIS DE *Eucalyptus* sp. UTILIZANDO VANT

RECIFE - PE

2022

STHÉFANY CAROLINA DE MELO NOBRE

QUANTIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM
PLANTIOS EXPERIMENTAIS DE *Eucalyptus* sp. UTILIZANDO VANT

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciências Florestais da
Universidade Federal Rural de
Pernambuco para obtenção do título de
Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva

Coorientador: Prof. Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira

RECIFE- PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N754q

Nobre, Sthéfany Carolina de Melo
Quantificação automatizada de variáveis dendrométricas em plantios experimentais de Eucalyptus sp.
utilizando VANT / Sthéfany Carolina de Melo Nobre. - 2022.
77 f. : il.

Orientador: Emanuel Araujo Silva.
Coorientador: Rinaldo Luiz Caraciolo
Ferreira. Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Florestais, Recife, 2022.

1. Sensoriamento remoto. 2. Inventário florestal. 3. Modelagem. I. Silva, Emanuel Araujo, orient. II.
Ferreira, Rinaldo Luiz Caraciolo, coorient. III. Título

CDD 634.9

STHÉFANY CAROLINA DE MELO NOBRE

**QUANTIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM
PLANTIOS EXPERIMENTAIS DE *Eucalyptus* sp. UTILIZANDO VANT**

Aprovado em: **24 de fevereiro de 2022.**

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Elisiane Alba
(Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE/UAST)

Prof. Dr. Gabriel Paes Marangon
(Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA)

Orientador:

Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva
(Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE)

RECIFE

Pernambuco – Brasil

Fevereiro – 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela vida, por sempre ter me sustentado, me dado muito mais além do que eu mereço, pelas bênçãos e livramentos recebidos. Sem Ele eu não chegaria até aqui.

Sou grata a minha mãe (Ilce) e aos meus irmãos (Caio e Jayska) pelo amor, carinho, por em todo tempo me apoiarem, confiarem, acreditarem em mim muito mais do que eu. Devo essa conquista a vocês e a toda minha família.

Ao meu namorado (Levi) que esteve ao meu lado em todo tempo me apoiando, incentivando e acreditando em minha capacidade.

Ao meu orientado, professor Emanuel Araújo Silva, por mesmo durante esses dois anos à distância, me ajudar e confiar a mim o desenvolvimento desse trabalho, sempre oferecendo o apoio necessário.

À UFRPE e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), pelo ensino, pela oportunidade de ingressar nessa instituição e desenvolver essa pesquisa. A todos os professores do PPGCF que compartilharam seus conhecimentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida durante esses 2 anos que me permitiu concluir o trabalho.

NOBRE, STHÉFANY CAROLINA DE MELO, **Quantificação automatizada de variáveis dendrométricas em plantios experimentais de *Eucalyptus* sp.** utilizando VANT. 2022. Orientador: Emanuel Araújo Silva. Coorientador: Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira.

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi avaliar a precisão do uso de Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) baseado na estrutura do movimento para subsidiar e automatizar a quantificação de variáveis dendrométricas em plantios experimentais de *Eucalyptus* sp. A área de estudo fica localizada no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas situado município de Rio Largo – AL. O levantamento dos dados foi realizado em duas áreas experimentais de povoamento florestal do híbrido *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophylla*), clones TP361, I144 e VE41. O plantio se deu em agosto de 2017, em uma área de aproximadamente 2,5 hectares. A coleta dos dados em campo foi realizada a partir de parcelas da população de eucalipto. Dessa maneira, mediu-se a altura total (H), o diâmetro à altura do peito (DAP), o diâmetro de copa (DC) e foi calculada a área basal (g) de todos os indivíduos em cada parcela. Para a obtenção das imagens aéreas foi utilizado o VANT da empresa DJI modelo Phantom 4 PRO com câmera RGB. O planejamento e execução do plano de voo foi feito por meio do aplicativo Dronedeploy. O Voo foi realizado por volta de 12h, em condição de pleno sol, com o objetivo de minimizar os efeitos de sombreamento das nuvens e de um indivíduo a outro. As imagens adquiridas por meio de VANT foram processadas utilizando o SfM (Structure from motion) no software Agisoft Photoscan e dessa forma foram geradas nuvens de pontos de cada parcela obtida no processamento. A partir da nuvem de pontos foram gerados modelo digital da superfície (MDS) e do terreno (MDT) e posteriormente a geração do ortomosaico. Por meio da diferença entre o MDS e o MDT foi gerado o CHM (Canopy Height Model), modelo digital de altura de copa, no software Qgis. Nota-se que a inserção de pontos de controle é fundamental para a diminuição dos erros do ajustamento das imagens. Os produtos gerados a partir do processamento das imagens de VANT com as configurações de voo aplicadas, como MDS, MDT, CHM e ortomosaico, apresentam alta resolução, exatidão adequada de localização e são capazes de fornecerem informações para auxiliar as etapas do inventário florestal. A estimativa de variáveis dendrométricas a partir de dados provenientes de imagens aéreas demonstrou ser viável e as métricas geradas por meio do pacote lidR e itcSegment apresentaram uma correlação positiva entre os valores estimados e os valores medidos em campo. É possível gerar estimativa de variáveis dendrométricas como DAP e altura utilizando métricas derivadas de sensores passivos embarcados em VANT. Essas descobertas em termos de cálculo de atributos florestais usando VANT oferecem um futuro promissor no manejo de recursos florestais para silvicultura de precisão.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, inventário florestal, modelagem.

NOBRE, STHÉFANY CAROLINA DE MELO, **Automated quantification of dendrometric variables in experimental plantations of *Eucalyptus* sp. using UAV**. 2022. Adviser: Emanuel Araújo Silva. Comitê: Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the accuracy of the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based on the structure from motion to support and automate the quantification of dendrometric variables in experimental plantations of *Eucalyptus* sp. The study area is located in the Campus of Engineering and Agricultural Sciences of the Federal University of Alagoas, located in the municipality of Rio Largo – AL. The data survey was carried out in two experimental areas of forest stand of the hybrid *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophylla*), clones TP361, I144 and VE41. Planting took place in August 2017 in an area of approximately 2.5 hectares. Field data collection was carried out from portions of the *Eucalyptus* population. Thus, the total height, diameter at breast height (DBH) and crown diameter of all individuals in each plot were measured. To obtain the aerial images, the UAV from the company DJI, model Phantom 4 PRO, with an RGB camera was used. The planning and execution of the flight plan was done through the Dronedeploy application. The flight was carried out around 12h, in full sun condition, in order to minimize the shading effects of clouds and from one individual to another. The images acquired through UAV were processed using the SfM (Structure from motion) in the Agisoft Photoscan software and, in this way, point clouds were generated for each plot obtained in the processing. From the point cloud, digital surface model (DSM) and terrain (DTM) models were generated, followed by the generation of the orthomosaic. Through the difference between the DSM and the DTM, the CHM (Canopy Height Model), a digital crown height model, was generated in the Qgis software. Note that the insertion of control points is essential to reduce errors in image adjustment. So far, it is clear that the products generated from the processing of UAV images with the applied flight configurations, such as MDS, MDT, CHM and orthomosaic, have high resolution, adequate location accuracy and are capable to providing information to assist the steps of the forest inventory. The estimation of dendrometric variables from data from aerial images proved to be feasible and the metrics generated through the lidR and itcSegment package showed a positive correlation between the estimated values and the values measured in the field. It is possible to generate estimates of dendrometric variables such as DBH and heights using measurements calculated from passive sensors embedded in UAVs. These findings in terms of quality of forest attributes using UAV support a promising future in the field of forestry resources for precision forestry.

Keywords: remote sensing, forest inventory, modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma aplicado na metodologia da pesquisa.....	29
Figura 2 - Localização do plantio experimental de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	30
Figura 3 – Croqui dos experimentos 1 e 2 para reconhecimento dos espaçamentos do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	32
Figura 4 – Croqui dos experimentos 1 e 2 para reconhecimento dos clones do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	33
Figura 5 – Croqui do experimento 2 para reconhecimento das adubações do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	34
Figura 6 – VANT da empresa DJI modelo Phantom 4 PRO com sensor RGB utilizado no levantamento aéreo no plantio experimental de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	36
Figura 7 – Plano de voo realizado no aplicativo Dronedeploy para o plantio experimental de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	36
Figura 8 – Exemplo dos alvos terrestres inserido no solo no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	37
Figura 9 – Fluxo de trabalho do processamento das imagens no software Agisoft Photoscan.....	37
Figura 10 – Relação entre altura e DAP e distribuição das variáveis medidas em campo no experimento 1 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	44
Figura 11 – Relação entre altura e DAP e distribuição das variáveis medidas em campo no experimento 2 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	45

Figura 12 – Localização dos pontos de controle no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	47
Figura 13 – Ortomosaico gerado no software Agisoft Photoscan voo do VANT no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	48
Figura 14 – MDT, MDS, CHM gerados por meio do voo do VANT no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	50
Figura 15 – Análise de resíduos, utilizando o pacote itcSegment, para a estimativa da altura das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	55
Figura 16 – Análise de resíduos, utilizando o pacote itcSegment, para a estimativa do diâmetro de copa das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de inventários florestais.....	20
Tabela 2 - Características dos experimentos analisados no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	31
Tabela 3 – Variáveis independentes transformadas para estimativa das variáveis dendrométricas das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	38
Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos dados coletados nos experimentos 1 e 2 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	43
Tabela 5 – Teste de Tukey entre as variáveis analisadas nos experimentos 1 e 2 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	43
Tabela 6 – Resultados dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis coletadas nos experimentos 1 e 2 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	46
Tabela 7 - Características provenientes do melhor voo do VANT no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	47
Tabela 8 – Erros nas coordenadas X, Y e Z do ortomosaico antes da inserção dos pontos de controle.....	49
Tabela 9 - Erros nas coordenadas X, Y e Z do ortomosaico após inserção dos pontos de controle.....	49
Tabela 10 - Erros nas coordenadas X, Y e Z do ortomosaico após inserção do ponto de checagem.....	49
Tabela 11 - Estatísticas descritivas dos dados proveniente do processamento com o pacote lidR no experimento 1 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	52
Tabela 12 - Correlação entre a altura medida em campo e a altura obtida por meio do processamento das imagens do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	52

Tabela 13 – Estatísticas descritivas dos dados proveniente do processamento com o pacote itcSegment no experimento 1 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	53
Tabela 14 – Melhores equações, utilizando o pacote itcSegment, para a estimativa da altura das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	54
Tabela 15 – Melhores equações, utilizando o pacote itcSegment, para a estimativa do diâmetro de copa das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.....	56

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ALS	<i>Airborne Laser Scanning</i>
CAP	Circunferência à Altura do Peito
CETENE	Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste
CHM	<i>Canopy Height Model</i>
DAP	Diâmetro à Altura do Peito
DC	Diâmetro de Copa
GCS	<i>Ground Control System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia E Inovação
MDA	Média das Diferenças Absolutas
MDS	Modelo Digital da Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
RQEM	Raiz Quadrada do Erro Médio
SFM	<i>Structure From Motion</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 PLANTIOS DE <i>Eucalyptus</i>	18
2.2 INVENTÁRIO FLORESTAL.....	19
2.2.1 Variáveis Dendrométricas.....	21
2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A INVENTÁRIO FLORESTAL.....	24
2.4 UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)	25
2.4.1 Structure from motion	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 ÁREA DE ESTUDO	29
3.2 CARACTERÍSTICAS DO EXPERIMENTO	30
3.3 OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS	34
3.4 COLETA DE DADOS VANT	35
3.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.....	37
3.6 ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS	38
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	39
3.7.1 Distribuição gráfica dos resíduos.....	39
3.7.2 Coeficiente de Correlação	40
3.7.3 Bias.....	40
3.7.4 Raiz quadrada do erro médio	41
3.7.5 Médias das diferenças absolutas	41
3.7.6 Coeficiente de determinação ajustado	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 INVENTÁRIO FLORESTAL.....	43
4.2 DADOS PROVENIENTES DE VANT.....	46
4.3 ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS	51
4.3.1 LidR	51
4.3.2 ITCsegment.....	53
5. CONCLUSÕES.....	59
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

Apresentando um rápido crescimento e uma variedade de espécies que são adaptadas as mais diversas condições de clima, o gênero *Eucalyptus* L'Héritier (Myrtaceae) representa o principal grupo de espécies plantadas no Brasil (IBÁ, 2020). O Brasil possui cerca de 10 milhões de hectares de áreas cobertas por florestas plantadas, sendo mais de 70% composta por espécies do gênero *Eucalyptus* (IBGE, 2020).

Devido a adaptabilidade em diferentes ambientes e a alta produtividade, a cultura de eucalipto se consolidou no setor florestal brasileiro como uma das principais fontes de matérias-primas renováveis e produtos derivados. Porém a viabilidade do cultivo depende da capacidade produtiva do local e do manejo aplicado (CASTRO et al., 2019). No sentido de melhorar as técnicas de manejo, realiza-se o inventário florestal, que é o principal meio de coleta de informações sobre a situação dos plantios florestais, sendo a base para o desenvolvimento de estratégias eficazes para maximizar o uso dos recursos florestais (CORONA, 2011). Dessa maneira, a partir do inventário florestal, é obtido a quantificação de variáveis dendrométricas.

A quantificação de variáveis dendrométricas é uma das principais atividades em um inventário florestal. Devido às grandes extensões de áreas plantadas, torna-se inviável e oneroso a medição de todas as árvores, por isso, é comum a aplicação de técnicas de amostragem que buscam obter informações a partir de amostras para representar toda a população (WEST, 2015).

Existem diferentes métodos para predição de variáveis dendrométricas, tais como a mensuração, por meio de métodos diretos (destrutivos) e métodos indiretos, utilizando técnicas de amostragem ou sensoriamento remoto. O inventário florestal convencional é conhecido por fazer uso de técnicas destrutivas, por muitas vezes realizar a derrubada de árvores, além de apresentar algumas limitações em relação aos altos custos, erros e abrangência (FIORENTIN, 2015; PERTILLE et al., 2019).

Os altos custos podem ser relacionados ao pagamento de pessoal, transporte, serviço de terceiros, entre outros. Os erros de inventários muitas vezes estão ligados às medições. Já em relação a abrangência, os inventários florestais são limitados pois nem sempre toda a área é avaliada, causando o erro amostral (SANQUETTA et al., 2014). Por isso, tem sido utilizado com maior frequência os métodos indiretos, a partir de informações geoespacializadas, como os dados advindos de sensoriamento remoto aplicados para diversas finalidades como planejamento e obtenção de parâmetros florestais (FIORENTIN, 2015; PERTILLE et al.,

2019).

Os dados de sensoriamento remoto aplicados a usos agrícolas, ambientais e florestais são obtidos, principalmente, por meio das imagens de satélites orbitais que apresentam diversos sensores passivos (fotografias aéreas) e ativos (radares) que possuem diferentes características de resolução espacial, espectral, entre outras (HELMER et al., 2015).

Por ser menos onerosa e de fácil obtenção, a utilização de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) é apresentada como uma alternativa mais viável, quando comparado com as técnicas de sensoriamento remoto que são obtidas via satélite, aérea e/ou a partir de métodos de aquisição de imagens de alta resolução (GRAÇA; MITISHITA; GONÇALVES, 2017; SOBRINHO et al., 2018). Além de possuírem capacidade de voos em baixas altitudes e baixas velocidades, possibilitando a captura de imagens com resolução espacial ultra-alta (1 a 20 cm), permitindo a coleta de dados próximos à Terra (RANGO et al., 2009; KOH; WICH, 2012; WHITEHEAD; HUGENHOLTZ, 2014; ZHANG et al., 2016).

A utilização de VANTs no meio florestal evita muitas limitações devido às condições atmosféricas, as quais são fatores restritivos na observação da superfície pelos satélites orbitais, pois usualmente não são influenciados pela presença de nuvens (SALAMÍ; BARRADO; PASTOR, 2014). Da mesma maneira, a baixa resolução espacial de muitos dados espaciais para detectar e medir determinadas propriedades biofísicas críticas como, brechas no dossel da floresta e identificação de árvore única, alterações fenológicas, são desvantagens do uso de imagens de satélite (PANEQUE- GÁLVEZ et al., 2014; WHITEHEAD et al., 2014; ZHANG et al., 2016).

Puliti et al. (2017), consideram que o uso de dados obtidos por meio de VANTs são eficazes no inventário florestal, pois a combinação de dados espaciais com dados de campo aumenta a precisão das estimativas, e oferece uma alternativa econômica para avaliação de recursos florestais em larga escala.

Os VANTs podem ser utilizados com diversos tipos de sensores, conhecidos como sensores ativos e passivos. Sensores ativos do tipo LiDAR (Light Detection and Ranging), que possuem sua própria fonte de radiação, apresentam alto custo, quando comparados com os sensores passivos. Por isso, na maioria das utilizações dos VANTs na área florestal são usados sensores passivos, que necessitam de uma fonte de radiação externa como a luz solar, principalmente na região do visível (RGB) ou com bandas do infravermelho (TANG; SHAO, 2015; TORRESAN et al., 2017).

A utilização de sensores passivos em diversas aplicações é possível devido ao

desenvolvimento do processamento de imagens por meio das aplicações de técnicas computacionais como Structure from Motion (SfM). Esta técnica tem tornado possível a geração de nuvens de pontos 3D de forma semiautomática, que utiliza a sobreposição de múltiplas imagens, além de permitir a geração de diversos produtos como ortomosaicos e modelos digitais de superfície (FONSTAD et al., 2013).

A extração de nuvens de pontos a partir de fotografias aéreas digitais são similares às nuvens obtidas utilizando o sensor LiDAR. A obtenção das nuvens de pontos pode ser por meio de fotogrametria digital de curta distância, aerofotogrametria ou utilizando *laser scanner* que gera um banco de dados de fácil compreensão, por exemplo em formato de texto, que pode ser trabalhado em diversos softwares (SANTOS, 2017).

Devido as características dos VANTs mencionadas acima, e das novas técnicas de processamento, muitos estudos utilizando dados oriundos desses veículos surgiram nos últimos anos no meio florestal. Como análises de mapeamentos e tipos florestais (CUNLIFFE; BRAZIER; ANDERSON, 2016), de incêndios florestais (FERNÁNDEZ-GUISURAGA et al., 2018), de detecção de árvores individuais (BONNET; LISEIN; LEJEUNE, 2017), de estimativas de parâmetros dendrométricos como altura, diâmetro de copa, volume, biomassa e crescimento (GIANNETTI et al., 2018; GOODBODY et al., 2017; ZHANG et al., 2016).

As fotografias aéreas obtidas por meio dos VANTs para a contagem automatizada de indivíduos e cálculo de área de copa, representa grande potencial para a obtenção rápida e precisa dos parâmetros dendrométricos, bem como serve de ferramenta para tomada de decisão das práticas silviculturais e em inventários florestais, podendo servir de subsídios para relações com o diâmetro à altura do peito (DAP) e geração de informação volumétricas de talhão florestais (NUNES; VIEIRA; CARVALHO, 2014).

A técnica SfM tem sido aplicada em dados de imagens utilizando VANT para produzir informações auxiliares de maneira semelhante aos dados de escaneamento a laser embarcados em aeronaves (ALS). Dessa forma, os dados VANT-SFM mostraram ser adequados para a estimativa parâmetros biofísicos de inventário florestal como altura, densidade e biomassa (GOODBODY; COOPS; WHITE, 2019; PULITI et al., 2015).

Dessa maneira, o presente trabalho fundamenta-se na hipótese de que os parâmetros dendrométricos, como altura, diâmetro à altura do peito (DAP), diâmetro de copa, entre outros, obtidos a partir de dados utilizando imagens de VANT sejam equiparáveis com as medições realizadas por meio de inventário florestal convencional.

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a precisão do uso de Veículo Aéreo Não-

Tripulado baseado na estrutura do movimento para subsidiar e automatizar a quantificação de variáveis dendrométricas em plantios experimentais de *Eucalyptus* sp. Os objetivos específicos são: i) mensurar o DAP, altura total e diâmetro de copa em plantios experimentais de *Eucalyptus* sp. por meio de inventário de campo convencional; ii) capturar imagens com VANT em plantios experimentais de *Eucalyptus* sp. utilizando a estrutura de movimento; iii) construir a composição das imagens por meio de técnicas de fotogrametria na extração de nuvens de pontos e construir Modelo Digital de Elevação e do Terreno; iv) obter altura, DAP, diâmetro de copa e número de indivíduos por meio do uso de imagens capturadas por meio de VANT e processadas utilizando softwares; v) comparar os dados de inventário florestal convencional com os adquiridos utilizando o VANT; e vi) estimar variáveis dendrométricas por meio de modelos lineares e não lineares utilizando os dados provenientes das imagens aéreas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PLANTIOS DE *Eucalyptus*

O eucalipto pertence à família das Mirtáceas e é nativo da Austrália, onde cobre 90% da área do país, formando densos maciços florestais nativos (BERTOLA, 2004). Segundo Alzate (2004), nesse gênero existem mais de 600 espécies que são adaptadas a diferentes condições de clima e solo.

Estima-se o ingresso do gênero *Eucalyptus* no Brasil ocorreu por volta de 1868, inicialmente no Rio Grande do Sul, tendo como principal destino a produção de madeira para diversas finalidades como lenha, mourões e postes (MORA; GARCIA, 2000). Atualmente no Brasil, plantios com o gênero *Eucalyptus* ocupam uma área de cerca de 7,5 milhões de hectares, em diversas regiões, sendo os estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul os maiores detentores das áreas cultivadas, seguidos por São Paulo (RODRIGUES et al., 2021). As florestas plantadas no Brasil são basicamente destinadas a produção de madeira serrada, celulose, papel, pisos laminados, painéis de madeira e carvão vegetal (IBÁ, 2020).

As espécies do gênero *Eucalyptus* possuem diversas características que torna o cultivo delas uma atividade bastante promissora, como a fácil adaptação a diversas condições climáticas, alta diversidade de espécies, múltiplos usos e técnicas de cultivos modernas (MORA; GARCIA, 2000). Além do rápido crescimento, permitindo, em regiões tropicais como no Brasil, que as espécies desse gênero possuam ciclos de corte entre 5 e 7 anos (GUEDES et al., 2015; SCOLFORO et al., 2016).

A seleção das espécies a serem plantadas depende principalmente do clima e das características físicas e químicas do solo, tanto quanto da destinação da produção madeireira (GONÇALVES et al., 2017; MARCATTI et al., 2017). A maioria dessas espécies são de porte arbóreo, possuindo propriedades físicas e químicas que as tornam capazes de serem utilizadas para diversas finalidades, como uso na produção de biomassa, de papel e celulose, madeira serrada, entre outros (LONGUE JÚNIOR; COLODETTE, 2013).

Desde os primeiros plantios de florestas com o gênero *Eucalyptus* no Brasil, diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar o comportamento das variáveis dendrométricas a partir de diferentes tratamentos silviculturais, diferentes métodos de medições e quais implicações na produção florestal (MURTA JÚNIOR et al., 2020).

Devido a isso, recentemente, o Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste (Cetene), em associação com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), incentivou a

implantação de unidades experimentais de *Eucalyptus* spp., com o objetivo de proporcionar a diversidade produtiva em Alagoas (APIMEC, 2015).

2.2 INVENTÁRIO FLORESTAL

Fazer um inventário florestal consiste em realizar procedimentos que permitam obter informações quantitativas e qualitativas sobre os recursos florestais de uma área e características ambientais sobre as quais as árvores estão inseridas. Dentre as variáveis quantitativas destacam-se volume, biomassa e carbono estocado (HUSCH; MILLER; KERSHAW, 2003). Para obter essas informações, são utilizadas técnicas de mapeamento, mensuração florestal e amostragem, entre outras, com o objetivo de alcançar dados precisos e confiáveis, com baixo custo (MEUNIER; SILVA; FERREIRA, 2001).

A diferença entre inventários florestais e simples levantamentos é a representatividade amostral e a validação estatística que apresenta (SANQUETTA et al., 2014). Esta diferença está relacionada ao uso de métodos de amostragem que objetivam obter estimativas dos parâmetros florestais nas áreas onde as árvores estão inseridas (UBIALI et al., 2009).

O inventário é importante para a realização do manejo florestal, para conservar as florestas, para o planejamento regional e para fundamentar a tomada de decisões (HUSCH; MILLER; KERSHAW, 2003). Além de servir como base para o desenvolvimento de política florestal regional ou nacional (KERSHAW JR et al., 2016).

Em plantio de eucaliptos, o inventário florestal inicia-se entre 12 e 24 meses. Esta idade permite que ele seja usado como ferramenta de monitoramento silvicultural, por ainda ser possível que o povoamento responda a tratos culturais corretivos (HAKAMADA, 2015).

Os níveis e periodicidades de atualização de inventário florestal, bem como os métodos de pesquisa e tecnologias aplicadas, variam em cada país de acordo com o uso almejado, custos inerentes, prazos e precisão desejada de inventário. Medições florestais realizadas por meio de parcelas têm sido a base para inventários florestais por mais de 200 anos (VAN LAAR; AKÇA, 2007; NEWNHAM et al., 2015). Uma parcela pode ser entendida como uma área, geralmente de forma quadrada, retangular ou circular, designada para as medições das variáveis florestais. Essas medições são essenciais para a obtenção de informações atualizadas, abrangentes e detalhadas para o monitoramento dos recursos florestais, mas é preciso que um número suficiente de parcelas amostrais seja estabelecido para caracterizar sistematicamente a variabilidade da floresta (WALLACE et al., 2016; LIANG et al., 2018).

De acordo com Soares, Neto e Souza (2006), os inventários florestais podem ser classificados de acordo com cinco variáveis (Tabela 1):

Tabela 1 – Classificação de inventários florestais.

Objetivos	Abrangência	Obtenção de dados	Abordagem da população no tempo	Detalhamento dos resultados
<ul style="list-style-type: none"> • Tático; • Estratégico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nacional; • Regional; • Área restrita. 	<ul style="list-style-type: none"> • Enumeração total ou censo; • Amostragem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inventário em uma ocasião ou temporário. • Inventário contínuo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exploratório; • Reconhecimento; • Detalhados.

Os inventários florestais são instrumentos fundamentais utilizados para diagnosticar o potencial produtivo das florestas por servirem como subsídios para a tomada de decisão no planejamento florestal. Simultaneamente podem ser utilizados para vários tipos de levantamentos que objetivem o reconhecimento, diagnóstico e avaliações na área a ser inventariada (FRANCEZ et al., 2010).

Na etapa de planejamento de um inventário florestal, deve-se estabelecer os objetivos antecipadamente, bem como as variáveis que serão medidas e qual erro percentual será admitido. Considera-se o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura as variáveis mais importantes, pois elas combinadas ou de forma isolada podem ser utilizadas para a estimação do volume, da biomassa e da área basal (PEINHOPF, 2012).

Atualmente, os inventários florestais podem ser combinados com diversas técnicas de mapeamento que proporcionam um maior desempenho. A partir do advento de métodos automatizados para a obtenção de dados, como por exemplo o sensoriamento remoto, a aquisição de informações das áreas de difícil acesso e sem cartografia foi facilitada (LIMA, 2017).

O inventário florestal pode ser realizado, basicamente, por meio de dois processos. O primeiro é o censo ou inventário 100% em que todas as árvores da área de interesse são medidas. Este processo permite obter os valores reais dos parâmetros medidos da população, sem erros amostrais, porém com um alto custo e, por isso, em muitas situações torna-se inviável. Já o segundo é o método de amostragem, que consiste na coleta de informações de parte da população total, ou seja, de uma amostra que possibilita realizar inferências sobre o todo,

causando erro amostral, porém é realizado em menor tempo e com menores custos (AUGUSTYNCZIK, 2013; DINIZ, 2007; WEST, 2015).

2.2.1 Variáveis Dendrométricas

A altura de árvores, o diâmetro à altura do peito (DAP), o diâmetro de copa e outras variáveis estruturais da floresta são exemplos de dados básicos importantes de um inventário florestal convencional. Elas são de grande importância para a pesquisa sobre estimativa de biomassa florestal, volume de madeira, ciclo de carbono florestal e mudanças climáticas globais. Com o desenvolvimento da tecnologia, muitos resultados de pesquisas têm sido obtidos utilizando dados de sensoriamento remoto para extrair informações sobre as variáveis da estrutura florestal (LIU et al., 2018).

2.2.1.1 Diâmetros à altura do peito (DAP)

O diâmetro é uma característica que pode ser facilmente avaliada, embora seja possível a medição de vários diâmetros ao longo do fuste é mais comumente utilizado o diâmetro com casca à altura do peito (DAP), a 1,30 m do solo. Pode ser medido com auxílio de alguns instrumentos como a suta, a fita métrica e também através do desvio da seção do fuste da forma circular, entre outros (SOARES; NETO; SOUZA, 2006).

A medida do diâmetro em qualquer ponto da árvore é obtida a partir da hipótese de que, em cada local de medição, o diâmetro da seção se aproxima do diâmetro de um círculo (CUNHA, 2004).

A partir dos valores de diâmetro é possível obter as classes diamétricas que possibilita a predição ou prognose da produção florestal a partir do diagnóstico das classes nas quais ocorrem maior concentração de indivíduos permitindo a identificação de tipos florestais e a elaboração do planejamento florestal que leva em consideração a dinâmica da população florestal (SCOLFORO, 2006).

Para Silva e Paula Neto (1979) e Machado e Figueiredo Filho (2009) o diâmetro à altura do peito é considerada a variável mais importante em relação as outras informações obtidas em um inventário florestal, por ser:

- Uma variável de fácil acesso e medição. O operador possui contato direto com o tronco da árvore, permitindo a medição direta do diâmetro por meio de diversos instrumentos simples

e fáceis de serem utilizados;

- Serve de base para a determinação de outras variáveis, como volume, avaliação de biomassa ou estudo de crescimento;
- Possibilita conhecer a frequência com que as árvores ocorrem nas classes diamétricas, dessa forma permite conhecer a distribuição diamétrica do povoamento, auxiliando nas decisões da condução do povoamento como no plano de manejo e aproveitamento econômico das florestas.

2.2.1.2 Altura

A altura de árvores é um parâmetro importante para quantificar os recursos madeireiros e é fundamental para avaliar os valores econômicos e ecológicos de um povoamento florestal. Em particular, a altura possui um importante papel no cálculo de volume individual e total do povoamento, na avaliação da capacidade produtiva total de um sítio e na determinação da capacidade de uma árvore acessar os recursos ambientais na dinâmica de competição entre as outras árvores do povoamento (KERSHAW JR et al., 2016; WEST, 2015; THENKABAIL, 2015). As árvores mais baixas podem ter o seu desenvolvimento e crescimento prejudicados, por estarem sendo sombreadas por outras árvores. Já as árvores mais altas, possuem posição privilegiada em relação à luz solar, possibilitando uma maior taxa de crescimento e menor mortalidade (BATISTA; COUTO; FILHO, 2014).

Além disso, a altura é essencial na estimativa da biomassa florestal e do estoque de carbono, que são fatores de crescente relevância para mitigação das mudanças climáticas por meio de atividades florestais (ANDERSEN et al., 2006; BOLTE et al., 2009; SPATHELF et al., 2018; PICARD et al., 2012).

Como um parâmetro típico de mensuração em inventários florestais e em programas de monitoramento, a altura de árvores é medida no campo por meio da medição direta (determinada) ou indireta (estimada) da distância entre a base (nível do solo) e o topo da árvore (BRAGG et al., 2014). A medição direta é realizada pelo operador diretamente sobre a árvore, por exemplo, por meio de métodos destrutivos nos quais as árvores são abatidas e o comprimento determinado ao longo do solo com fita métrica. Já os métodos indiretos são não destrutivos, podendo ser geométricos ou trigonométricos, por meio de medições de campo com hipsômetro, dispositivo a laser ou estação total (ANDERSEN et al., 2006; APOSTOL et al., 2016). Mensuração indireta de árvores também é possível utilizando técnicas de sensoriamento

remoto, como medições fotogramétricas tradicionais derivadas de imagens aéreas analógicas (SPURR et al., 1960), fotogrametria aérea digital (GUERRA-HERNANDEZ et al., 2016), técnicas de sensoriamento remoto com sensor ativo como LiDAR (Light Detection and Ranging) ou radar (KAARTINEN et al., 2012; MALTAMO; NÆSSET; VAUHKONEN, 2014).

2.2.1.3 Diâmetro de copa

O tamanho da copa é definido como o espaço horizontal que está disponível para a disposição das folhas (BULLOCK, 2000). É responsável pela formação do espaço de crescimento das árvores que está diretamente associado à disponibilidade de recursos necessários ao crescimento delas (O'HARA, 1988). Em inventários florestais, a estimativa do tamanho da copa é considerada de vital importância pois está associada a diversos fatores de manejo florestal, como a capacidade fotossintética (HEMERY et al., 2005), o volume do tronco (BONNOR, 1968), a competição entre as árvores (YANG; HUANG, 2017), a saúde e o vigor das plantas (GOTTSCHALK; MACFARLANE, 1993).

Essa variável tem mostrado ser um indicador ecológico multifuncional. Ela determina, além dos fatores mencionados acima, o sequestro de carbono, sombreamento, risco de quebra pelo vento e crescimento das árvores (PANAGIOTIDIS et al., 2017).

Diâmetro de copa é outra variável mensurada durante o inventário florestal. Ele possui uma importância significativa pois é fortemente correlacionado com outras variáveis da árvore que são usadas para estimar o volume estocado. Atualmente o diâmetro de copa de cada árvore individual no povoamento florestal tem sido medido separadamente por métodos terrestres. O Modelo de Altura de Copa (Canopy Height Model – CHM) e o Modelo Digital de Superfície (MDS) criados a partir de imagens de VANT de alta resolução possibilitam a determinação dos diâmetros das copas das árvores de todo o povoamento de forma rápida (GRZNÁROVÁ et al., 2019).

Muitos estudos utilizam fotogrametria a partir de VANT para determinar o diâmetro de copa, como, por exemplo, usando a técnica de análise de imagem baseada em objeto (OBIA) (GUERRA-HERNANDEZ et al., 2016; JOHANSEN; RAHARJO; MCCABE, 2018; TORRES-SÁNCHEZ et al., 2015) ou algoritmos como a segmentação Watershed (PANAGIOTIDIS et al., 2017).

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A INVENTÁRIO FLORESTAL

O sensoriamento remoto pode ser definido como a ciência que tem como objetivo desenvolver imagens da superfície da Terra por detecção quantitativa e medir as respostas das interações da radiação eletromagnética com os alvos terrestres. Entretanto, as técnicas de sensoriamento remoto não só permitem a obtenção de imagens, mas também de dados e informações detalhadas sobre vegetação, bem como a correlação entre a radiação eletromagnética e as variáveis medidas em campo (ALBA et al., 2017; MENESES; ALMEIDA, 2012). Em geral, o sensoriamento remoto pode ser entendido como o conjunto de técnicas que permite obter dados sobre um alvo terrestre, de maneira que o sensor esteja a uma distância remota dele e, portanto, não exista contato físico entre os dois (FIGUEIREDO, 2005).

Atualmente o sensoriamento remoto é uma das tecnologias que tem sido mais utilizada no setor florestal com o propósito de monitoramento, inventário e mapeamento. Técnicas de sensoriamento remoto com o objetivo de obter informações em grandes áreas podem ser conduzidas em diferentes níveis de precisão de acordo com os diferentes objetivos a serem alcançados (GENNARO et al., 2020).

Plataformas de sensoriamento remoto como os sistemas de satélites, aeronaves transportadas e veículo aéreo não tripulado (VANTs) têm características que diferem em termos de resolução espacial, área de cobertura, resolução temporal, processos operacionais e custos (GENNARO et al., 2020).

Imagens provenientes de satélites em órbita são um dos principais meios de obtenção de dados de sensoriamento remoto aplicados a estudos ambientais e florestais, apresentam uma grande quantidade de sensores com diferentes características (HELMER et al., 2015).

Esses sensores podem ser divididos em passivos e ativos. Sensores ativos são aqueles que possuem uma fonte de energia própria, ou seja, eles mesmos emitem uma quantidade de energia suficiente em direção aos alvos para captar sua reflexão, pode-se citar como exemplo os radares, câmeras com flash e LiDAR. Já os sensores passivos não possuem uma fonte própria de energia, ou seja, precisam de fontes externas, como por exemplo o sol, para captar a reflexão dos alvos. Além dessa classificação, os sensores ainda podem ser divididos em imageadores e não imageadores. Os sensores imageadores traduzem a informação coletada em forma de imagem, semelhante a uma fotografia. Já os sensores não imageadores traduzem os dados coletados sob a forma de gráficos e dados digitais diversos (FITZ, 2013).

Aeronaves transportadas fornecem melhores resoluções de imagens, retornando um elevado grau de detalhamento em comparação com as imagens obtidas por satélites, porém com um maior esforço de planejamento de voo e maiores custos operacionais (MATESE et al., 2015). VANTs são plataformas pequenas e flexíveis caracterizadas pelo baixo custo operacional, alta resolução espacial e temporal, mas são adequadas para cobrir apenas áreas limitadas (YU et al., 2018). Comparações entre as diferentes plataformas de sensoriamento remoto têm sido feitas tanto em agricultura quanto em florestas (PULITI et al., 2017; FANKHAUSER et al., 2018).

O sensoriamento remoto pode complementar as técnicas terrestres existentes, fornecendo características espacialmente representativas dos povoamentos florestais estudados de maneira mais eficiente. Os dados capturados em várias escalas espaciais, espectrais e temporais mostraram conter informações, que podem ser usadas para medir e monitorar vários aspectos de uma estrutura florestal complexa (GÓMEZ et al., 2012; KANE et al., 2013). Avanços na aquisição dessas informações fizeram com que o sensoriamento remoto tridimensional (3D) de alta resolução espacial se tornasse uma importante ferramenta na modelagem florestal (ZELLWEGER et al., 2013; OTA et al., 2015).

Avanços recentes no sensoriamento remoto, como LiDAR e Fotogrametria digital, abriram novas possibilidades além da estimativa da altura de árvores individuais, permitiu a estimativa de diâmetro de copa (FALKOWSKI et al., 2006; HYYPPA et al., 2005). Essas variáveis podem ser posteriormente utilizadas para estimar características de árvores individuais, como diâmetro de tronco e volume (JUCKER et al., 2017).

2.4 UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs), podem ser denominados de aeronaves não tripulada ou também aeronaves remotamente pilotadas o que sugerem que são veículos pilotados de forma remota ou automática, ou seja, não necessitam de um piloto humano a bordo (DECEA, 2016; FAHLSTROM; GLEASON, 2012). Eles são controlados por um piloto por meio de uma estação terrestre ou um controle remoto, o que contribui para a diminuição do preço dessas operações (PÁDUA et al., 2017).

O sistema de aeronaves não tripuladas é composto por três características principais: a aeronave, a estação de controle de solo (Ground Control System – GCS) e o operador (GUPTA et al., 2013). Essas características podem variar dependendo do tipo de VANT e necessitar de

outros elementos como, por exemplo, sistema de decolagem e aterrissagem (CHAO; CHEN, 2012). Para que possa ser considerado um veículo aéreo, o veículo necessita conseguir levantar voo, permanecer no ar e ser guiado (ELKAIM; LIE; GEBRE-EGZIABHER, 2015).

Podem ser definidos como todo o sistema que inclui os equipamentos necessários e todos os técnicos preparados para controlar a aeronave não tripulada (GUPTA et al., 2013). Estas plataformas oferecem o potencial de serem usadas em diversas aplicações, como ambientais, emergência/resgate, vigilância e sistemas agroflorestais (SANTAMARIA et al., 2012).

Os VANTs são normalmente divididos em dois grupos: de asas fixas e de asas giratórias (TOTH; JÓZKÓW, 2016). Os dois tipos são usados em diferentes condições a depender da área a ser mapeada, da complexidade geográfica, da resolução espacial desejada, das condições climática e do espaço para decolagem e pouso (ANDERSON; GASTON, 2013). VANTs de asas fixas normalmente permitem viagens mais longas em um único voo, utilizando a mesma bateria, atingindo uma alta velocidade, tornando-os especialmente adequados para uso em áreas maiores com resolução espacial atingindo alguns centímetros. Por outro lado, VANTs de asas giratórias ou multirotores, que possuem um conjunto de hélices ao redor de seu núcleo, são mais flexíveis, sendo adequados para cobrirem áreas menores com capacidade de obter uma resolução espacial subcentimétrica. Além disso, quando comparados com os VANTs de asas fixas, os de asas giratórias têm melhor capacidade de realizar manobras, uma vez que são capazes de permanecer em uma posição fixa, são menos sujeitos a vibrações e têm a capacidade de decolar e pousar verticalmente (TOTH; JÓZKÓW, 2016). VANTs de asas fixas necessitam de um corredor para decolagem e pouso. Em cada projeto é necessário a escolha do VANT apropriado, bem como dos sensores e das câmeras que podem ser incluídos nessas plataformas (ANDERSON; GASTON, 2013).

Em pesquisas com florestas naturais, mistas ou inequiâneas, os VANTs têm sido empregados usualmente para: estimar parâmetros dendrométricos como altura dominante, número de fustes, área de copa, volume e biomassa acima do solo usando câmeras RGB (PARK et al., 2019; LAURIN et al., 2019) e sensores com varredura a laser (ZHANG et al., 2019; MCCLELLAND et al., 2019); classificação de espécies, detecção de plantas invasoras e monitoramento da biodiversidade usando câmera RGB (WAITE et al., 2019; WU et al., 2019), multiespectral (FRANKLIN; AHMED, 2018; KOMÁREK; KLOUČEK; PROŠEK, 2018) e sensores com varredura a laser (DASH et al., 2019); monitoramento da saúde da floresta e mapeamento de doenças usando diferentes sensores para fornecer dados que deem suporte a

intervenções no manejo florestal (MAES et al., 2018; OTSU et al., 2018; CARDIL et al., 2019; ZHANG et al., 2019); monitoramento da recuperação após incêndios ou intervenções de conservação utilizando VANT embarcados com câmeras RGB e multiespectrais (LARRINAGA; BROTONS, 2019; PÁDUA et al., 2019).

Duas abordagens foram desenvolvidas para capturar a estrutura 3D de povoamentos florestais a partir de sensores a bordo de VANTs: o uso de scanners a laser (WALLACE et al., 2012) e o uso de algoritmos de visão computacional e imagens capturadas de câmeras fixas (LISEIN et al., 2013). Os sistemas de varredura a laser medem o tempo de voo de um pulso de laser emitido para ser refletido de um recurso interceptado e retornar ao sensor, a partir do qual uma medição de alcance pode ser calculada. Nuvens de pontos derivadas de imagens são geradas com técnicas de visão computacional/fotogrametria, como estrutura de movimento (SfM) (WALLACE et al., 2016).

2.4.1 Structure from motion

Structure from motion (SfM) é uma técnica baseada em visão computacional que facilita a reconstrução fotogramétrica apenas a partir de imagens. Ao contrário da fotogrametria tradicional, as informações 3D podem ser calculadas a partir de imagens 2D sobrepostas, sem a necessidade de informações de pré-requisito sobre localização e orientação da câmera, calibração da câmera e/ou pontos de referência levantados na cena. Isso permite o uso de plataformas de imagem de baixo custo, tanto para aplicações aéreas quanto terrestres (SMITH et al., 2015).

O SfM é uma técnica que pode ter diversas aplicações, mas em relação ao processamento de imagens pode ser definida como o processo que promove a autocalibração das câmeras e a geometria da cena simultânea e automaticamente, para isso, utiliza pontos correspondentes nas imagens (GRANSHAW, 2016). Ganhou popularidade nos últimos anos devido à sua capacidade de lidar com conjuntos de imagens não ordenadas e heterogêneas sem conhecimento prévio dos parâmetros da câmera (WESTOBY et al., 2012).

Entre as tecnologias de sensoriamento remoto, a fotogrametria SfM oferece uma solução de baixo custo e de abordagem flexível para coletar informações sobre a estrutura florestal, portanto, naturalmente, tem havido um aumento no interesse em usar esses dados para inventário florestal (IGLHAUT et al., 2019).

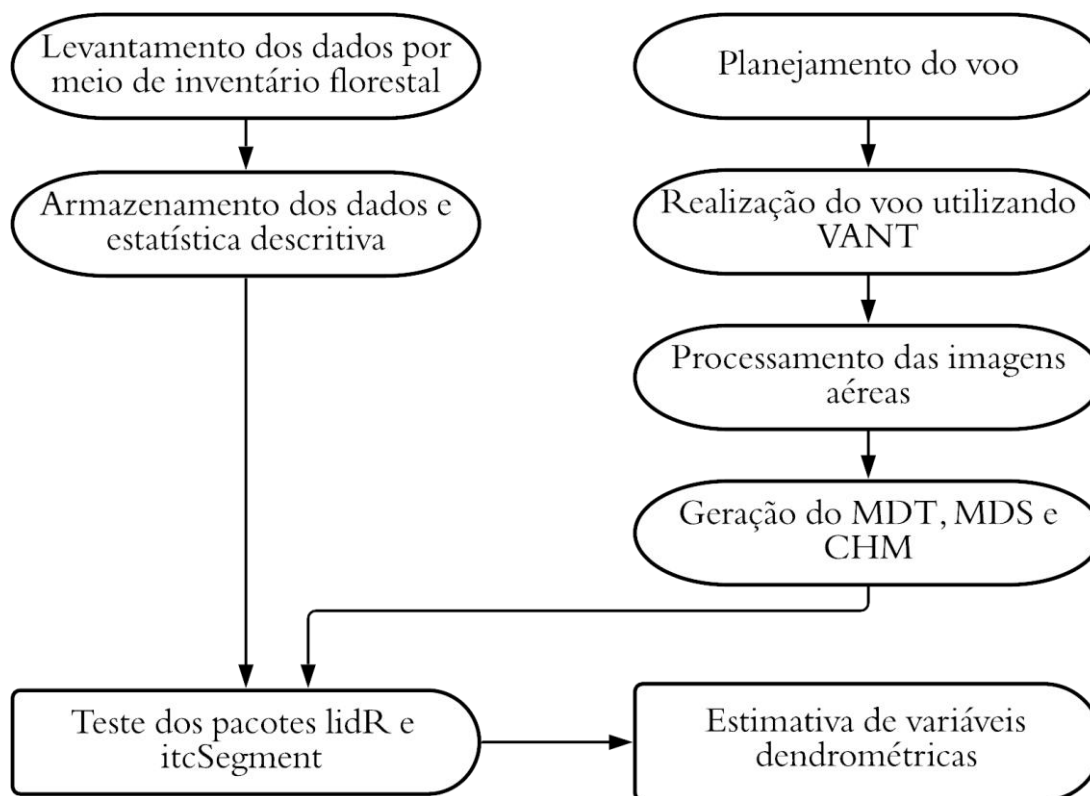
A aplicação da técnica SfM permite produzir um modelo de nuvem de pontos 3D de alta resolução espacial semelhante aos derivados do LiDAR aerotransportado (OTA et al., 2015). O VANT-SfM tem quatro vantagens quando comparado às aquisições utilizando LiDAR. Em primeiro lugar, o VANT-SfM é menos oneroso de adquirir, principalmente quando se utiliza equipamento mais simples (DANDOIS; ELLIS, 2013). Em segundo lugar, os dados do VANT podem ser facilmente adquiridos em alta frequência para avaliar as mudanças diurnas ou sazonais, como a fenologia (LISEIN, 2015). Terceiro, SfM normalmente tem densidade de pontos muito mais alta, muitas vezes por mais de uma ordem de magnitude em comparação com dados típicos de LiDAR aéreo (DANDOIS; ELLIS, 2013), fornecendo detalhes em escala detalhada sobre a estrutura da floresta (por exemplo, ramificação, distribuição de folhas, clareiras). Finalmente, a estrutura combinada e as informações de cores suportam uma série de investigações científicas que não seriam possíveis usando apenas a nuvem de pontos x, y, z do LiDAR transportado pelo ar, incluindo mudança fenológica da vegetação e monitoramento da saúde da floresta (MICHEZ, 2016).

Embora o SfM tenha sido aplicado principalmente a dados de imagem, nos últimos anos, tem havido um crescente avanço no desenvolvimento de aplicativos SfM terrestres para substituir ou aumentar as coletas de dados de campo (IGLHAUT et al., 2019). O uso de técnicas SfM aplicadas a dados de imagens aéreas para inventário florestal foi iniciado por Dandois e Ellis (2010). Esses autores foram os primeiros a usar uma série de imagens sobrepostas adquiridas usando uma câmera montada em uma pipa para produzir uma densa nuvem de pontos 3D representando o dossel da floresta. Uma primeira tentativa de modelar as propriedades biofísicas da floresta usando dados VANT-SfM foi feita por Dandois e Ellis (2010) e Lisein et al. (2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada nesse estudo pode ser visualizada, de uma forma resumida, no fluxograma demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma aplicado na metodologia da pesquisa.

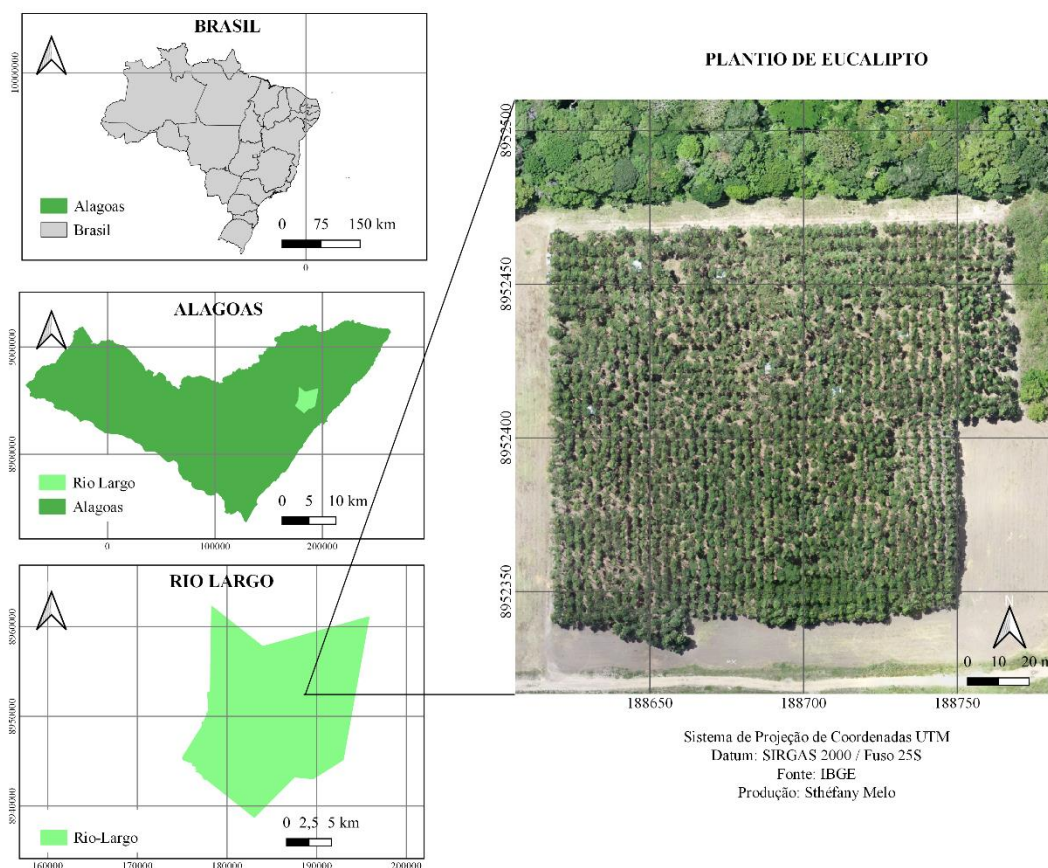


3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo fica localizada no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas situado município de Rio Largo – AL (9° 29' 45'' S, 35° 49' 54'' O e altitude de 127m), região Ambiental da Zona da Mata do estado de Alagoas, o clima da região, pela classificação climática de Köppen, é “As”, ou seja, tropical chuvoso, com verão seco e inverno chuvoso (CRUZ et al., 2008) com temperatura média anual de 25,3° C e precipitação de 1441mm. O solo do local é classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso

Argissólico, de textura média/argilosa e declividade inferior a 2% (ALMEIDA et al., 2008). O mapa de localização da área de estudo está apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Localização do plantio experimental de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



3.2 CARACTERÍSTICAS DO EXPERIMENTO

O levantamento dos dados foi realizado em duas áreas experimentais de povoamento florestal do híbrido *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophylla*), clones TP361, I144 e VE41. O plantio se deu em agosto de 2017 em uma área de aproximadamente 2,5 hectares. As informações gerais desses experimentos estão apresentadas na Tabela 2.

Originalmente cada parcela possuía 25 indivíduos, sendo 5 linhas com 5 árvores em cada. O plantio foi conduzido a partir de um manejo florestal tradicional, no qual foi realizado capinas manuais, adubação de base durante a fase de implantação, adubação de cobertura semestral. Também foi realizado o controle de formigas cortadeiras (da ordem Hymenoptera: Formicidae), a partir de aplicação de iscas granuladas Mirex S-Max ® (Sulfonamidas

Fluoroalifáticas), 8g/m² de terra solta do formigueiro, ao longo dos caminhos ou das trilhas próximos aos olheiros ativos, conforme a instrução do fabricante.

Tabela 2 - Características dos experimentos analisados no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Parâmetros	Experimento 1	Experimento 2
Clones	VE41	VE41
	I144	I144
		TP 361
Espaçamento	3 x 3	
	3 x 4	3 x 2
	3 x 2	
Adubação		NPK
		EUCAFÓS
		NPK + UHF
Idade (anos)	4	4
Parcelas	18	27

O experimento 1 possui 3 blocos, cada bloco com 6 parcelas, da mesma maneira experimento 2 possui 3 blocos, porém cada bloco possui 9 parcelas. A distribuição das parcelas, dos clones VE41, I144 e TP361; dos espaçamentos 3 x 4, 3 x 3 e 3 x 2; e das adubações NPK, EUCAFÓS e NPK + UHF foi feita conforme o croqui apresentado nas Figuras 3, 4 e 5.

Figura 3 – Croqui dos experimentos 1 e 2 para reconhecimento dos espaçamentos do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

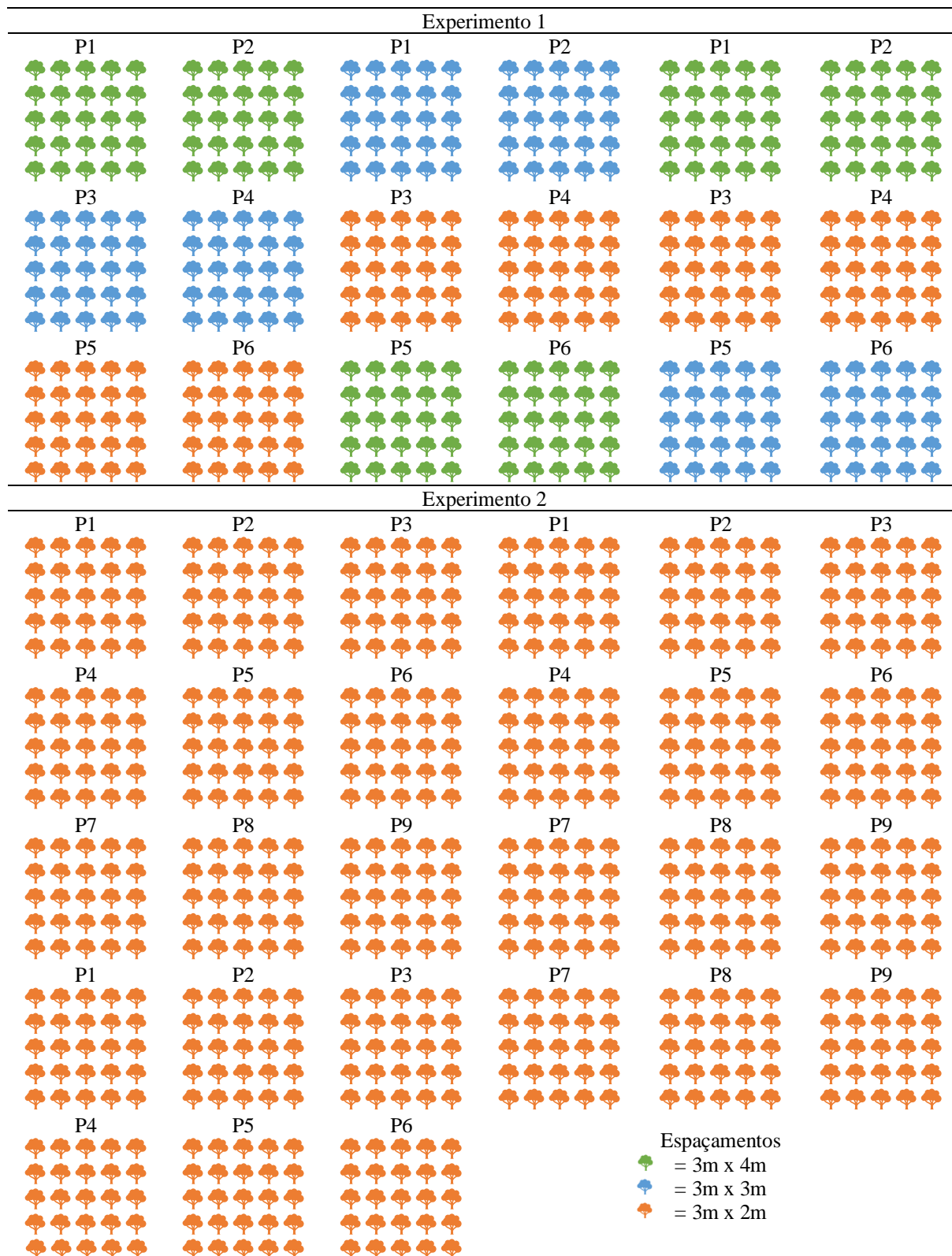


Figura 4 – Croqui dos experimentos 1 e 2 para reconhecimento dos clones do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

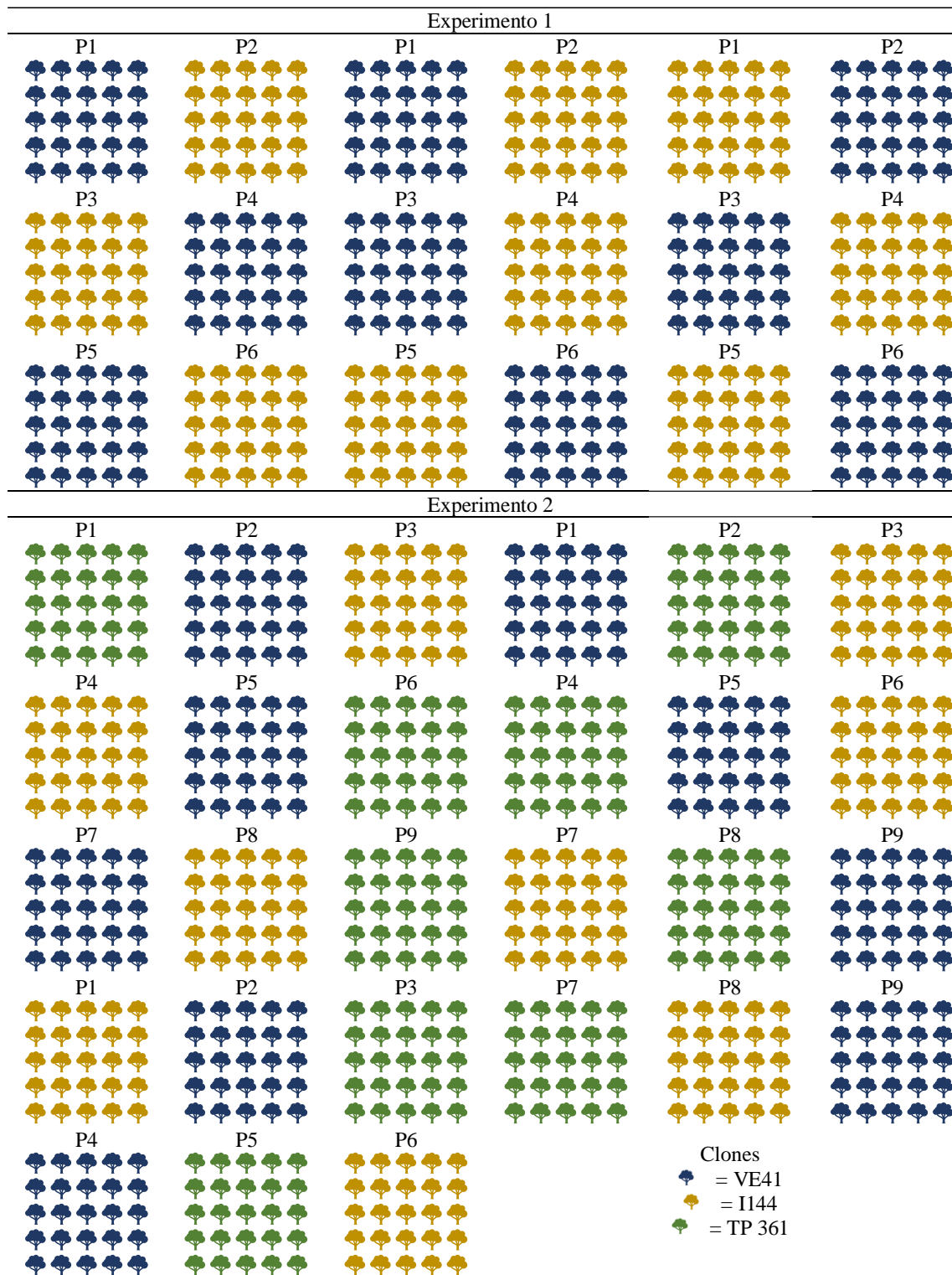
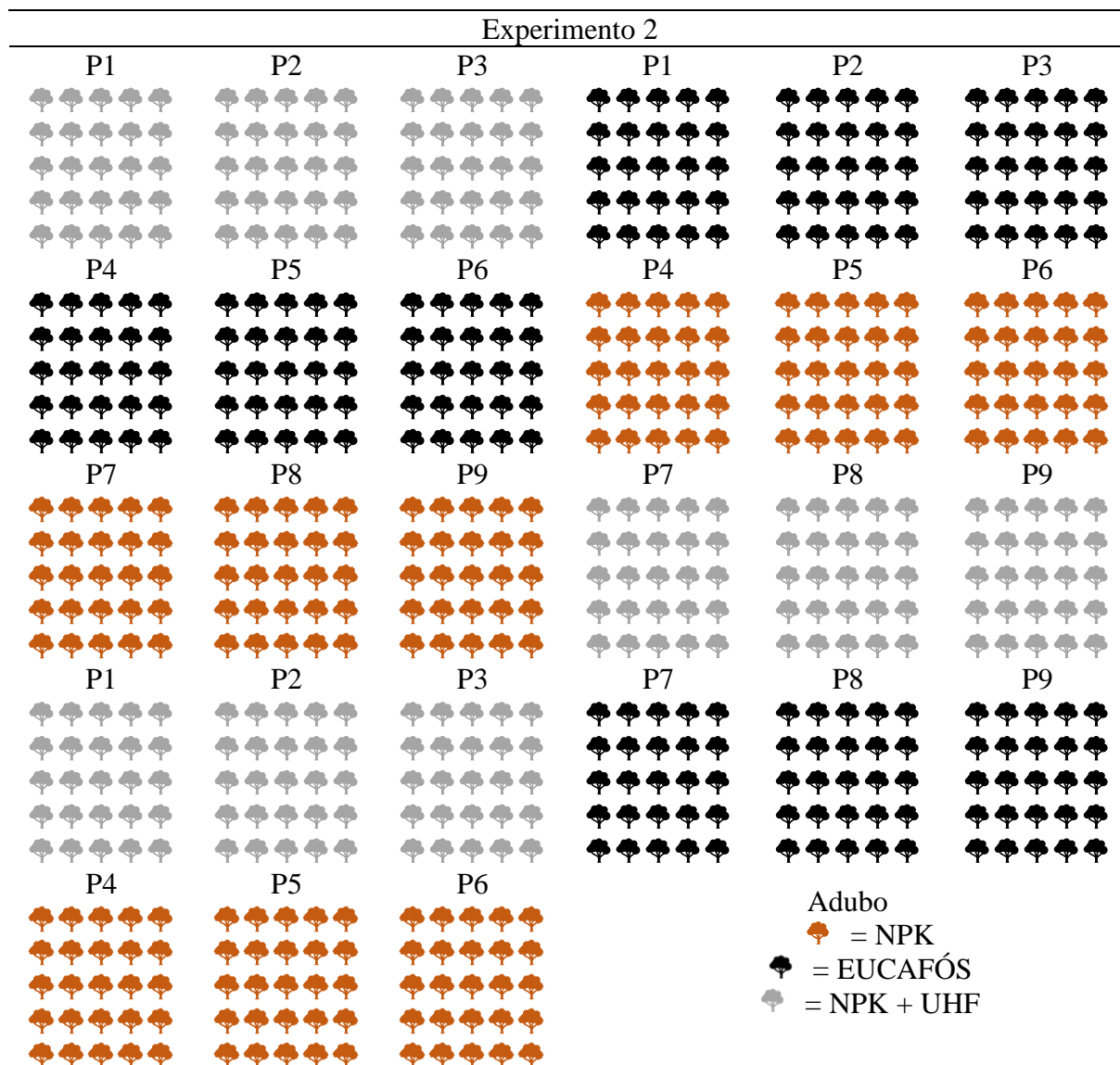


Figura 5 – Croqui do experimento 2 para reconhecimento das adubações do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



3.3 OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

A coleta dos dados em campo foi realizada a partir de parcelas da população de eucalipto, neste caso, foram medidas todas as árvores do plantio desconsiderando-se as árvores da bordadura de cada parcela. Dessa maneira, mediu-se a altura total, o diâmetro à altura do peito (DAP) e o diâmetro de copa de todos os indivíduos em cada parcela. O levantamento desses dados foi feito em cada linha de plantio, sendo cada árvore identificada de acordo com sua posição na parcela e na linha. As medições foram realizadas em 4 dias nos meses de março e abril de 2021, totalizando 1084 árvores para as análises posteriores.

A altura total foi mensurada utilizando o Telêmetro Laser SNDWAY, no qual a altura é calculada pela relação trigonométrica entre as distâncias e ângulos. Para essa mensuração, o operador deve manter-se a uma distância da árvore de aproximadamente a altura dela e então mirar o telêmetro na base para obter a distância (d), depois no começo da copa para a obtenção do ângulo baixo (β) e por fim no topo da árvore para obter o ângulo alto (α). Para calcular a altura total foi utilizada a fórmula a seguir:

$$H(m) = [\text{tg}(\beta) * d] + [\text{tg}(\alpha) * d] \quad (1)$$

A circunferência à altura do peito (CAP) foi medida a 1,30 m do solo com o auxílio de fita métrica e posteriormente transformada em DAP a partir da divisão de CAP por Pi (π). Já o diâmetro de copa foi medido com trena, tomando a medida do diâmetro na linha e entre linhas do plantio e sendo posteriormente calculada a média das duas medidas.

Utilizando o DAP, foi calculado a área basal de cada indivíduo a partir da fórmula abaixo:

$$g(\text{cm}^2) = \frac{\pi * \text{DAP}^2}{40000} \quad (2)$$

Os dados foram anotados e depois armazenados em planilhas eletrônicas. Para verificar o perfil dos experimentos, foram feitas estatísticas descritivas (valores de médias, máximo, mínimo, desvio padrão, mediana, gráficos de dispersão). Além dessas estatísticas, também foram analisados a correlação entre os valores das alturas, dos DAPs e dos diâmetros de copa por meio do coeficiente de Correlação de Pearson no software R.

3.4 COLETA DE DADOS VANT

Para a obtenção das imagens aéreas foi utilizado o VANT da empresa DJI modelo Phantom 4 PRO com câmera RGB (Figura 6). Este modelo possui uma bateria com autonomia de 30 minutos, além de poder voar a 50km/h com o modo que evita obstáculos ativo ou até 75km/h de velocidade máxima no modo esportivo.

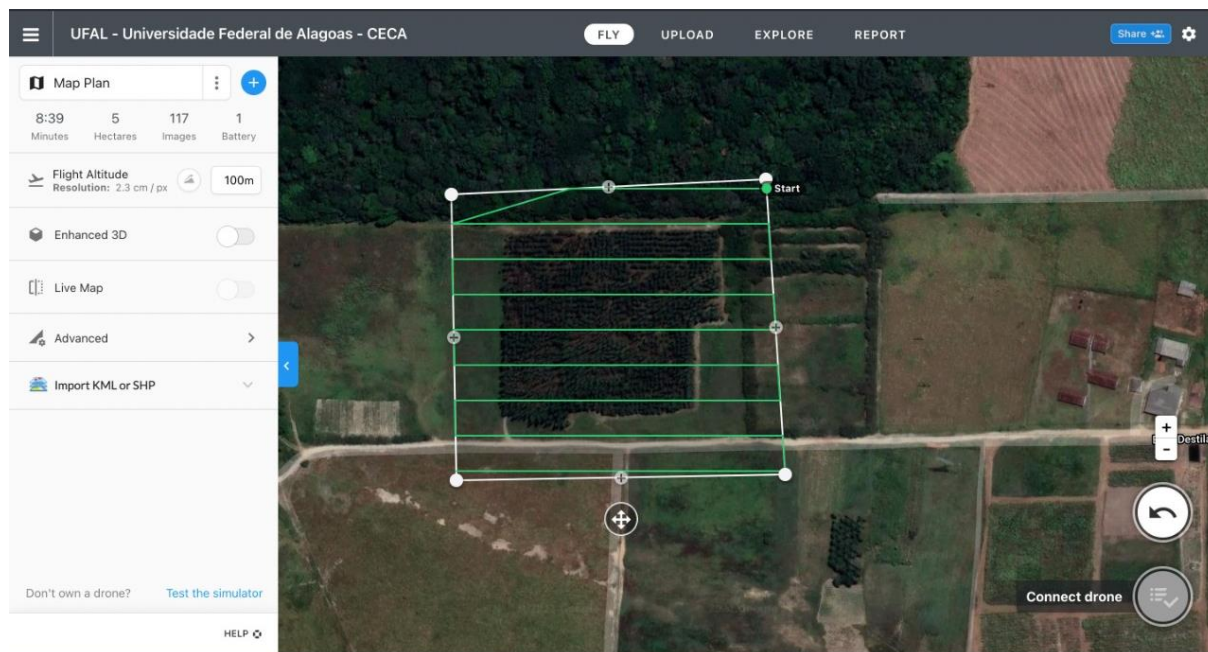
O planejamento e execução do plano de voo foi feito por meio do aplicativo Dronedeploy (Figura 7) para definição da altura e tempo de voo, bem como o GSD (Ground Sample Distance). A partir disso, foi estabelecido um GSD de 5 cm e recobrimento longitudinal

e lateral de 90%. Esses valores foram estabelecidos a partir de levantamentos na literatura e de experiências anteriores dos operadores do VANT.

Figura 6 – VANT da empresa DJI modelo Phantom 4 PRO com câmera RGB utilizado no levantamento aéreo no plantio experimental de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



Figura 7 – Plano de voo realizado no aplicativo Dronedeploy para o plantio experimental de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



O Voo foi realizado por volta de 12h, em condição de pleno sol, com o objetivo de minimizar os efeitos de sombreamento das nuvens e de um indivíduo a outro. No dia do levantamento, foram testadas quatro alturas de voo (100 m, 120 m, 150 m e 200 m). Em função

da grande incidência de vento foi escolhida a altura de 200 m, por apresentar maior qualidade. Colocou-se quatro alvos terrestres, feitos com cal em formato de X com dimensões de 1 m x 1 m (Figura 8), para posterior georreferenciamento dos dados, servindo de pontos de controle. Os pontos de controle, bem como os vértices de cada parcela foram georreferenciados (coordenadas X e Y) por meio de GNSS Trimble RTK R4 model 3 L1/L2 com precisão horizontal de 3 mm e vertical 3,5 mm.

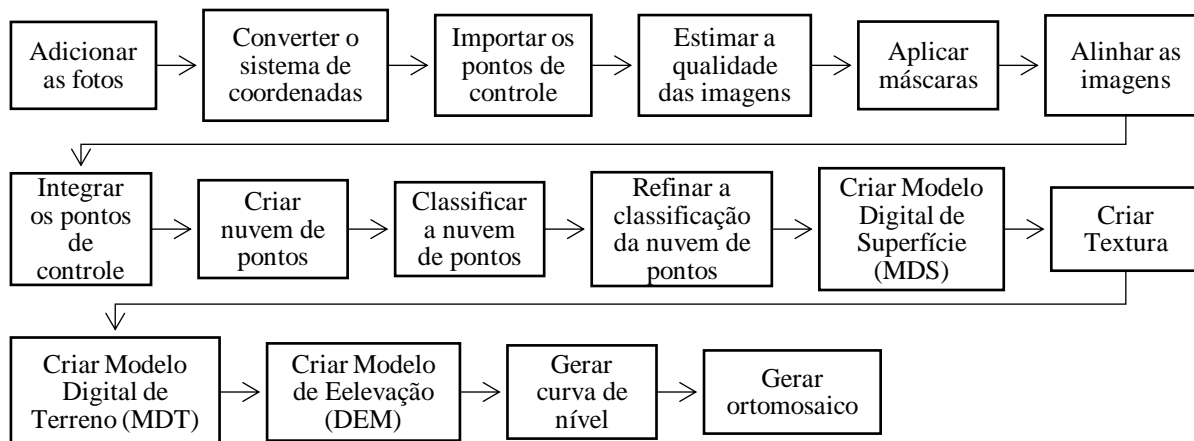
Figura 8 – Exemplo dos alvos terrestres inserido no solo no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



3.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

A Figura 9 apresenta o fluxograma do processamento das imagens que foi realizado no software Agisoft até a obtenção do ortomosaico.

Figura 9 – Fluxo de trabalho do processamento das imagens no software Agisoft Photoscan.



As imagens adquiridas por meio de VANT foram processadas utilizando o SfM (Structure from motion) no software Agisoft Photoscan e dessa forma foram geradas nuvens de pontos de cada parcela obtida no processamento. A partir da nuvem de pontos foram gerados modelo digital da superfície (MDS) e do terreno (MDT) e posteriormente a geração do ortomosaico.

Por meio da diferença entre o MDS e o MDT foi gerado o CHM (Canopy Height Model), modelo digital de altura de copa, no software Qgis. Utilizando os arquivos de nuvem de pontos oriundos do levantamento de VANT foram testados os pacotes lidR e itcSegment do software R. Esses pacotes permitem extrair árvores individuais e calculam métricas como altura, DAP, diâmetro de copa e até biomassa de todo povoamento, parcela ou árvore.

3.6 ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

Utilizando os dados provenientes do inventário florestal, do processamento das imagens obtidas por meio do voo de VANT e das métricas advindas dos pacotes lidR e itcSegment, foram construídas equações de regressão linear e não linear. Dada a grande quantidade de variáveis disponíveis, foi utilizado o método *stepwise* no software R que consiste em adicionar cada variável ao modelo, permanecendo na equação apenas as variáveis que possuiu o maior coeficiente de determinação (R^2) e que se mostrou significativo. Na Tabela 3, estão apresentadas as transformações das variáveis independentes utilizadas no método *stepwise*.

Tabela 3 – Variáveis independentes transformadas para estimativa das variáveis dendrométricas das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Variável independente	Variável independente transformada
Hd	Hd^2, Hd^3, Hd^4, Hd^5
	$1/Hd, 1/Hd^2, 1/Hd^3, 1/Hd^4, 1/Hd^5$
	$\ln(Hd), \ln(Hd^2), \ln(Hd^3), \ln(Hd^4), \ln(Hd^5)$
	$\ln(1/Hd), \ln(1/Hd^2), \ln(1/Hd^3), \ln(1/Hd^4), \ln(1/Hd^5)$
	$Hd^{1/2}, Hd^{1/3}, Hd^{1/4}, Hd^{1/5}$
DAPd	$DAPd^2, DAPd^3, DAPd^4, DAPd^5$
	$1/DAPd, 1/DAPd^2, 1/DAPd^3, 1/DAPd^4, 1/DAPd^5$
	$\ln(DAPd), \ln(DAPd^2), \ln(DAPd^3), \ln(DAPd^4), \ln(DAPd^5)$
	$\ln(1/DAPd), \ln(1/DAPd^2), \ln(1/DAPd^3), \ln(1/DAPd^4), \ln(1/DAPd^5)$
	$DAPd^{1/2}, DAPd^{1/3}, DAPd^{1/4}, DAPd^{1/5}$
DCd	$DCd^2, DCd^3, DCd^4, DCd^5$
	$1/DCd, 1/DCd^2, 1/DCd^3, 1/DCd^4, 1/DCd^5$

$$\begin{aligned} & \text{Ln}(\text{DCd}), \text{Ln}(\text{DCd}^2), \text{Ln}(\text{DCd}^3), \text{Ln}(\text{DCd}^4), \text{Ln}(\text{DCd}^5) \\ & \text{Ln}(1/\text{DCd}), \text{Ln}(1/\text{DCd}^2), \text{Ln}(1/\text{DCd}^3), \text{Ln}(1/\text{DCd}^4), \text{Ln}(1/\text{DCd}^5) \\ & \text{DCd}^{1/2}, \text{DCd}^{1/3}, \text{DCd}^{1/4}, \text{DCd}^{1/5} \end{aligned}$$

Onde: Hd = Altura total, em metros, obtidas pelo processamento das imagens aéreas; Diâmetro à altura do peito (1,30 m), em centímetros; DAPd = Diâmetro à altura do peito (1,30 m), em centímetros, obtidos pelo processamento das imagens aéreas; DC = Diâmetro de copa, em metros, obtidos pelo processamento das imagens aéreas. Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Para estimativa da altura medida em campo (Hc), usando os dados advindos do processamento com o pacote itcSegment, foram utilizadas como variáveis independentes o diâmetro a altura do peito (DAPd) e o diâmetro de copa (DCd) obtidos por meio das imagens aéreas. Já para a estimativa do diâmetro de copa medido em campo (DCc) foram utilizadas como variáveis independentes o diâmetro a altura do peito (DAPd) e o altura (Hd) obtidos por meio das imagens aéreas.

Utilizando o pacote lidR, foi feita a correlação entre a altura medida em campo (Hc) e a altura obtida por meio do processamento das imagens aéreas (Hd).

As análises foram feitas por bloco, pois cada bloco possui diferenças de espaçamentos, clones e adubações. Foram utilizados os valores médios das variáveis dendrométricas para cada parcela de cada bloco do experimento estudado. Ou seja, foram utilizados seis valores de altura, de diâmetro à altura do peito e de diâmetro de copa dos três blocos.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A comparação entre as equações modeladas utilizando dados advindos de inventário florestal com o auxílio de sensoriamento remoto foi baseada nos seguintes critérios estatísticos:

3.7.1 Distribuição gráfica dos resíduos

Os gráficos de distribuição de resíduos entre a variável dependente observada e estimada possibilita a verificação do ajuste ou modelagem da equação ao longo de toda a amplitude dos dados. Através dessa análise é possível detectar se há possíveis tendências de ajuste ao longo de toda a linha de regressão, necessária para a tomada de decisão de utilizar ou não o modelo. Indica se há ou não homogeneidade dos resultados do ajuste ao longo da linha de estimativa (LIMA, 2015).

Os resíduos foram obtidos através da fórmula a seguir:

$$E_i = \frac{(\hat{Y}_i - Y_i)}{Y_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que:

E_i = Resíduos da iésima observação;

Y_i = Variável dependente observada;

\hat{Y}_i = Variável dependente estimada pela regressão.

3.7.2 Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação ($R_{\hat{y}y}$) é a expressão que indica o grau de ajustamento, de afinidade ou de dependência das variáveis X e Y com o modelo testado. Esse coeficiente varia de -1 a +1 e, em valor absoluto, de zero a 1 ou de zero a 100%. O sinal negativo ou positivo indica se a reta é decrescente ou crescente respectivamente. Para a determinação do $R_{\hat{y}y}$ foi utilizada a expressão abaixo (SILVA; SILVA, 2002):

$$R_{\hat{y}y} = \frac{n^{-1} \left(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - Y_m) \right)}{\sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2 (n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_m)^2)}}; \hat{Y}_m = n^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i \quad (4)$$

Em que:

n = total da variável dependente estimada pelo modelo;

\hat{Y}_i = Variável dependente estimada pela regressão.

\hat{Y}_m = Média da variável dependente estimada pela regressão;

Y_i = Variável dependente observada;

Y_m = Média da variável dependente observada.

3.7.3 Bias

O parâmetro estatístico Bias ou Viés significa o desvio sistemático do valor real, ou seja, o desvio que existe entre as variáveis medidas e estimadas, em termos sistemáticos, permitindo tirar conclusões sobre a tendência dos erros cometidos pelo modelo, tendo como valor ideal igual a zero. A equação abaixo foi utilizada para determinação do Bias (MIRANDA, et al., 2019).

$$\text{Bias} = n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (5)$$

Em que:

n = total da variável dependente estimada pelo modelo;

Y_i = Variável dependente observada;

\hat{Y}_i = Variável dependente estimada pela regressão.

3.7.4 Raiz quadrada do erro médio

A raiz quadrada do erro médio (RQEM) é um dos parâmetros estatísticos mais importantes. Consiste em ser a raiz quadrada do erro ao quadrado e foi calculado através da fórmula a seguir (BRUCE; BRUCE, 2019):

$$\text{RQEM}\% = 100 Y_m^{-1} \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (6)$$

Em que:

n = total da variável dependente estimada pelo modelo;

Y_i = Variável dependente observada;

\hat{Y}_i = Variável dependente estimada pela regressão;

Y_m = Média da variável dependente observada.

3.7.5 Médias das diferenças absolutas

A média das diferenças absolutas (MDA) corresponde à média dos valores absolutos do erro e foi estimada através da equação abaixo (CURTO et al., 2019):

$$\text{MDA} = (n^{-1} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i|) \quad (7)$$

Em que:

n = total da variável dependente estimada pelo modelo;

Y_i = Variável dependente observada;

\hat{Y}_i = Variável dependente estimada pela regressão;

3.7.6 Coeficiente de determinação ajustado

O coeficiente de determinação (R^2) é um dos parâmetros estatísticos mais utilizados para avaliar modelos de regressão. Indica o quanto da variável independente pode ser explicada pelo modelo (RODRIGUES, 2019). Como sugerido por Schneider et al. (2009), esse coeficiente não deve ser utilizado sozinho para a seleção de um modelo de equação, por ser um parâmetro crescente à medida que se inclui uma nova variável. Por isso, foi ajustado de acordo com o número de coeficientes da equação, obtido através da expressão a seguir:

$$R_{aj}^2 = R^2 \left[\frac{K-1}{N-K} \right] \cdot (1-R^2) \quad (8)$$

Em que:

R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado;

R^2 = Coeficiente de determinação;

K = Número de variáveis independentes da equação;

N = Número de observações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INVENTÁRIO FLORESTAL

No inventário florestal foram mensurados os diâmetros à altura do peito (DAP) as alturas (H), os diâmetros das copas (DC) e calculada a área basal (g) de todas as árvores das parcelas, com os quais foram calculadas algumas estatísticas básicas dos experimentos. Na Tabela 4 estão apresentadas as estatísticas descritivas dos experimentos 1 e 2.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos dados coletados nos experimentos 1 e 2 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Parâmetros	Experimento 1				Experimento 2			
	DAP (cm)	H (m)	DC (m)	g (cm ²)	DAP (cm)	H (m)	DC (m)	g (cm ²)
Média	13,47	15,76	3,11	0,0149	11,58	14,54	2,51	0,0113
Desvio Padrão	2,84	3,12	0,61	0,0063	3,22	3,68	0,39	0,0057
Mínimo	5,09	5,14	1,25	0,0020	1,91	1,76	0,92	0,0003
Máximo	23,71	25,03	4,90	0,0442	24,83	28,66	3,85	0,0484
Mediana	13,24	15,81	3,05	0,0138	11,84	15,01	2,50	0,0110
Número de árvores	431				653			

O experimento 2 apresenta maior número de árvores por possuir um menor espaçamento (3 m x 2 m) e maior número de parcelas (27). O experimento 1 apresentou valores de DAP, altura, diâmetro de copa e área basal maiores em comparação ao experimento 2. Esses valores diferiram significativamente entre si a 5% de probabilidade utilizando o teste Tukey (Tabela 5).

Tabela 5 – Teste de Tukey entre as variáveis analisadas nos experimentos 1 e 2 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Experimento	DAP (cm)	Tukey	H (m)	Tukey	DC (m)	Tukey	g (cm ²)	Tukey
2	11,58	a1	14,54	a1	2,51	a1	0,0113	a1
1	13,47	a2	15,76	a2	3,11	a2	0,0149	a2

Esse fato se deu, principalmente porque o experimento 1 possui maiores espaçamentos. Resultado também obtido por Sereghetti et al. (2015) quando analisou o crescimento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sob diferentes espaçamentos. Caterina (2017), analisando o crescimento de *Eucalyptus* spp. em diferentes espaçamentos, também observou que indivíduos menos adensados apresentam valores maiores de variáveis dendrométricas, destacando-se o DAP. Os estudos realizados por Watzlawick e Benin (2020) apontaram que

para *Eucalyptus benthamii* os maiores valores médios de área basal foram registrados nos espaçamentos mais adensados.

As Figuras 10 e 11 apresentam os gráficos de dispersão entre a altura e o DAP, bem como as distribuições das frequências das variáveis DAP, altura, diâmetro de copa e área basal dos dois experimentos.

Figura 10 – Relação entre altura e DAP e distribuição das variáveis medidas em campo no experimento 1 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

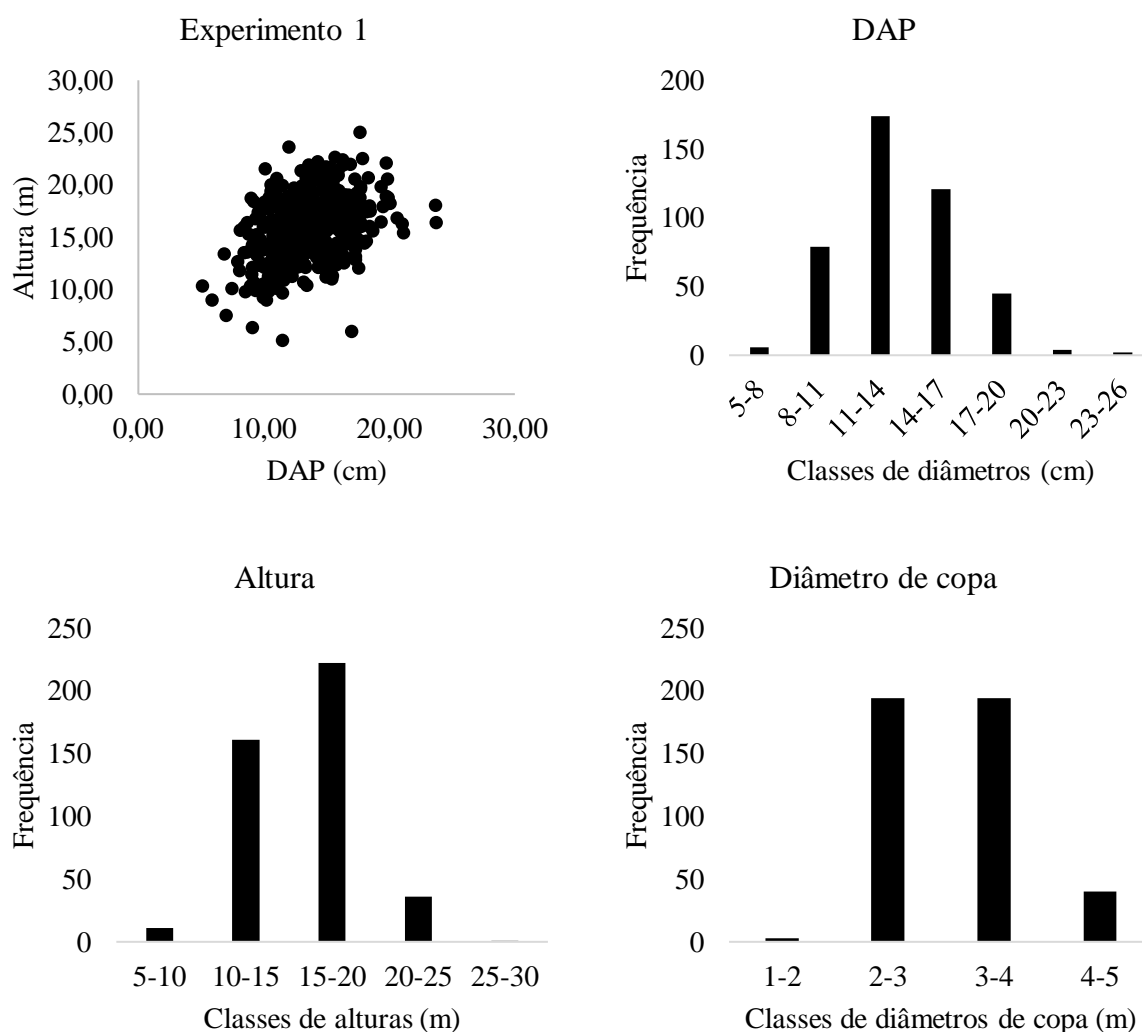
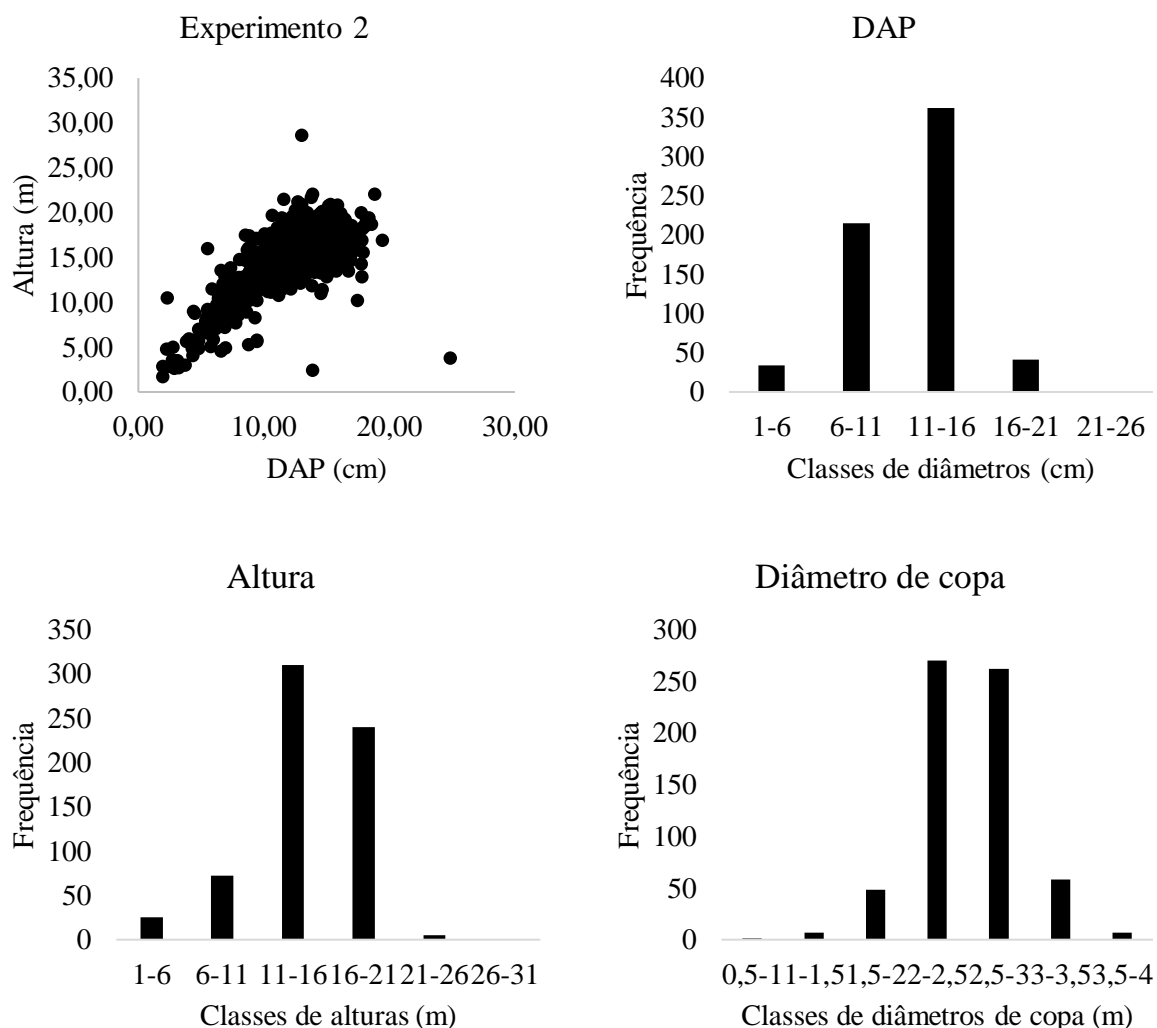


Figura 11 – Relação entre altura e DAP e distribuição das variáveis medidas em campo no experimento 2 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



De acordo com as informações apresentadas nas figuras acima, é possível notar que os experimentos possuem comportamento normal para as variáveis analisadas, bem como para a relação entre altura e DAP. Resultado também encontrado por Hentz (2018) analisando os dados obtidos por VANT para subsidiar inventários florestais.

A correlação entre os dados de altura, DAP e diâmetro de copa tanto do experimento 1 quanto do experimento 2 foi significativa ($p < 0,05$). Sendo os coeficientes de correlação de Pearson apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis coletadas nos experimentos 1 e 2 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Variáveis	Experimento 1			Experimento 2		
	H	DAP	DC	H	DAP	DC
H	1			1		
DAP	0,4	1		0,7	1	
DC	-0,01	0,5	1	0,1	0,3	1

A maior correlação encontrada no experimento 1 foi entre DAP e diâmetro de copa (0,5), resultado também encontrado por Vantropa et al. (2020) enquanto analisava as características morfométricas e dendrométricas de *Zanthoxylum rhoifolium* Lam. De acordo com Silva et al. (2017), o DAP apresenta forte correlação com o diâmetro de copa.

Já no experimento 2, o maior valor da correlação de Pearson foi entre as variáveis altura e DAP (0,7). Oliveira et al., (2018), estudando a previsão de áreas potenciais para o plantio de *Eucalyptus* spp., também obtiveram valor alto para a correlação linear entre essas variáveis. Guimarães (2019), estudando a influência dos espaçamentos nas características dendrométricas de eucalipto, observou que o DAP apresentou correlação forte com a altura.

Por ser uma variável dendrométricas de fácil obtenção, a correlação do DAP com as demais variáveis é, de acordo com Freitas et al. (2015), uma das correlações lineares de maior interesse sendo que a presença de correlações fortes pode contribuir para o ajuste de modelos de regressão, para estimar indiretamente alguma característica dendrométrica que demande maior tempo e custo para a sua obtenção.

4.2 DADOS PROVENIENTES DE VANT

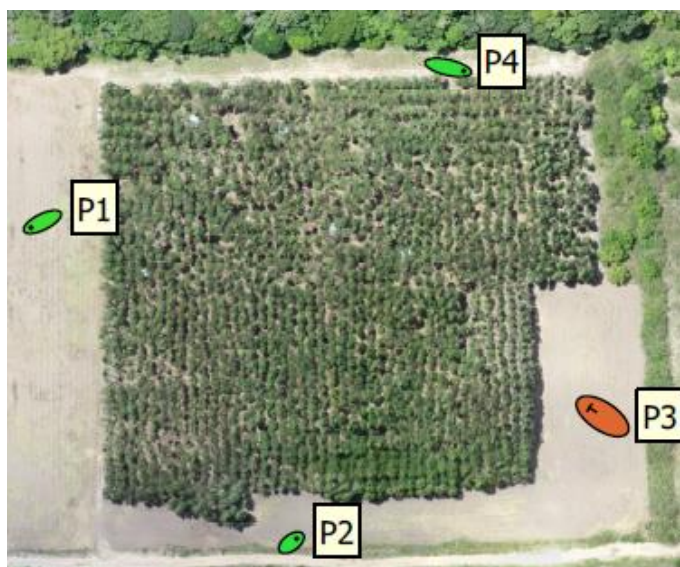
Foram realizados quatro voos na área de estudo, sendo as características do melhor voo apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características provenientes do melhor voo do VANT no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Parâmetros	Valores
Número de imagens	177
Altura do voo	222 m
Resolução	5,31 cm/pix
Área de cobertura	14,6 ha

O posicionamento de cada ponto de controle, imagem gerada a partir do processamento dos dados, está apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Localização dos pontos de controle no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



Onde: P1, P2 e P4 = pontos de controle; P3 = ponto de checagem.

O processamento das imagens, obtidas por meio do voo de VANT, foi feito no software Agisoft Photoscan e resultou em vários produtos sendo eles nuvem de pontos, MDS, MDT e em um ortomosaico (Figura 13).

Figura 13 – Ortomosaico gerado no software Agisoft Photoscan voo do VANT no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



Foram obtidas imagens de alta qualidade, com resultado satisfatório para a realização das demais análises. Da mesma forma que para os autores Chianucci et al. (2016), as imagens obtidas por meio de VANTs se mostraram eficientes e são consideradas como grande potencial no inventário florestal por permitir alcançar estimativas rápidas e com menor custo, além do que, as imagens de alta resolução são capazes de realizar análises de monitoramento de povoamentos florestais e de rotina em tempo real.

Além disso, Sobrinho et al. (2018) consideram ser possível visualizar que a obtenção e o processamento de imagens de obtidas utilizando VANTs vêm se revelando como um meio muito importante para o apoio em obtenção de informações, neste caso, a identificação dos indivíduos de *Eucalyptus* sp. apresentaram resultados nítidos e satisfatórios.

Segundo Zhang et al. (2016), o uso de VANT tem se mostrado mais vantajoso quando comparado com as demais técnicas de sensoriamento remoto, pois podem voar em baixas altitudes e em velocidades lentas, permitindo gerar imagens com uma alta resolução espacial (1 a 20 cm). Além disso, a combinação de baixa resolução espectral e alta resolução espacial das

imagens coletadas com VANT possibilitam novas abordagens no setor florestal, bem como a detecção de copas, quantificação de madeira e dos resíduos florestais (HUNG, 2012).

Os erros de localização nas coordenadas X, Y e Z estão apresentados na Tabela 8 e a correção desses pontos a partir da inserção dos pontos de controle e do ponto de checagem nas Tabelas 9 e 10 respectivamente.

Tabela 8 – Erros nas coordenadas X, Y e Z do ortomosaico antes da inserção dos pontos de controle.

X erro (m)	Y erro (m)	Z erro (m)	Total (m)
4,16	1,09	13,16	13,84

Tabela 9 - Erros nas coordenadas X, Y e Z do ortomosaico após inserção dos pontos de controle.

Pontos	X erro (cm)	Y erro (cm)	Z erro (cm)	Total (cm)
P1	-2,33	-1,16	0,07	2,60
P2	1,08	0,80	-0,08	1,34
P4	3,16	-0,71	-0,04	3,24
Total	2,35	0,91	0,06	2,52

Tabela 10 - Erros nas coordenadas X, Y e Z do ortomosaico após inserção do ponto de checagem.

Ponto	X erro (cm)	Y erro (cm)	Z erro (cm)	Total (cm)
P3	-2,68	1,77	1,69	3,63
Total	2,68	1,77	1,69	3,63

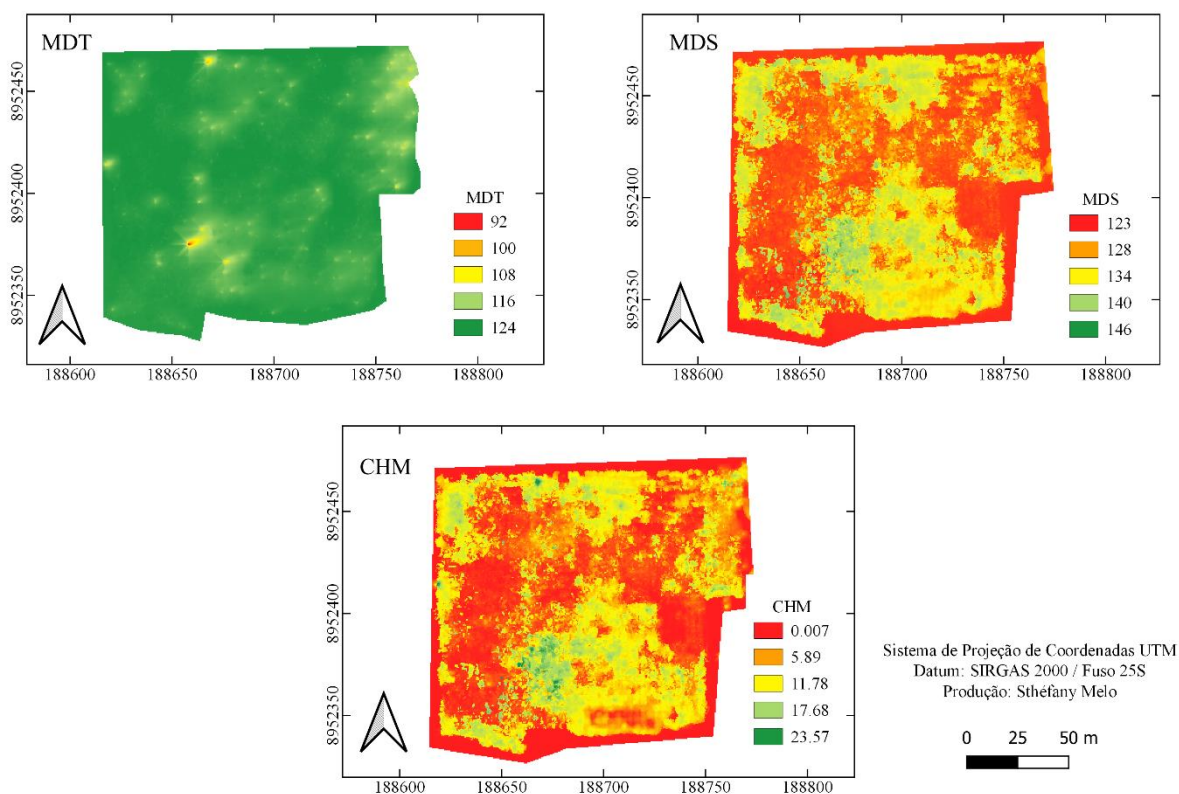
Nota-se que a inserção de pontos de controle é fundamental para a diminuição dos erros do ajustamento das imagens. Os maiores erros iniciais foram encontrados nas coordenadas X e Z (4,16 m e 13,16 m) que passaram de metros a centímetros com a inserção dos pontos de controle (2,35 cm e 0,06 cm). Esses valores podem variar dependendo das características da área, do número de pontos de controle utilizados e das condições do voo. Ota et al. (2017) obtiveram um erro total de 2,94 m utilizando 11 pontos de controle, já Agüera-Vega, Carvajal-Ramírez e Martínez-Carricondo (2017), utilizando 4 pontos de controle obtiveram um erro entre 6 cm e 8 cm. O uso de 3, 4 ou mais pontos de controle pode resultar em níveis aceitáveis de erro dependendo do objetivo da pesquisa, no entanto, conforme destacado nos trabalhos anteriores, pontos de controle em excesso não parecem melhorar substancialmente a qualidade da pesquisa. Com base nesse resultado decrescente, pode ser tentador reduzir a quantidade de

pontos de controle coletados, porém, eles são importantes para avaliar a qualidade da pesquisa, o que é necessário se pesquisas multitemporais forem realizadas, porquanto também podem ser usados como pontos de validação (TONKIN; MIDGLEY, 2016).

Ainda de acordo com Tonkin e Midgley (2016), pontos de controle de solo precisos são essenciais para georreferenciar nuvens de pontos SfM. Eles garantem que as superfícies 3D sejam corretamente registradas no espaço e, sem eles, os erros verticais aumentam de acordo com uma função quadrática com a distância ao ponto de controle mais próximo.

Além do ortomosaico também foram gerados os MDT e MDS. A partir desses modelos gerou-se o CHM. Na Figura 14 estão apresentados o MDT, MDS e CHM da área de estudo.

Figura 14 – MDT, MDS, CHM gerados por meio do voo do VANT no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



Por meio das nuvens de pontos provenientes das imagens aéreas foi possível a geração de MDS, que foi normalizado em um CHM, utilizando também o MDT, e com este CHM é possível detecção de árvores e estimativas de alturas, similar ao ALS (WHITE et al., 2016). O

MDT, MDS e CHM produzidos foram importantes para a extração das variáveis dendrométricas altura das árvores, área das copas das árvores e DAP.

De acordo com os modelos gerados, nota-se que não há uma grande amplitude topográfica na área, essa diferença gira em torno de 32 m. A exatidão da obtenção de alturas por fotogrametria depende de vários aspectos, que podem ser relacionados ao processamento das imagens ou a fatores do ambiente. Nesse estudo, o vento influenciou a qualidade dos dados gerados e por esse motivo alguns indivíduos não foram identificados.

Utilizando CHM, Locks e Matricardi (2019) puderam identificar a quantidade, a altura e o formato de copa de cada árvore emergente e perceberam que por meio dessa métrica pode-se observar outros aspectos da floresta como a presença de clareiras.

Por fim, para evidenciar a importância do CHM e para reduzir os erros que podem ser obtidos, os estudos realizados por Cai et al. (2021) constataram que o método baseado em CHM pode reduzir o erro de subestimação da cobertura do dossel ao definir um tamanho de pixel alto.

4.3 ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

As variáveis dendrométricas foram extraídas a partir das imagens aéreas utilizando dois pacotes do software R e estimadas a partir de equações de regressão linear e não linear. Para as estimativas, só foram utilizados os dados adquiridos no experimento 1, pois a extração dos dados relativos ao experimento 2 não foi realizado devido a erros cometidos durante o georreferenciamento da área, impossibilitando a demarcação das parcelas nas imagens no ambiente Qgis. Para corrigir esse problema seria necessário a ida a campo e georreferenciar novamente os vértices de cada parcela, bem como realizar o georreferenciamento de cada árvore. Assim, os erros obtidos seriam diminuídos e possibilitaria a extração dos dados nos dois experimentos.

4.3.1 LidR

O pacote lidR só possibilita obter a altura das árvores. Na Tabela 11, estão apresentadas as estatísticas descritivas do experimento 1.

Tabela 11 - Estatísticas descritivas dos dados proveniente do processamento com o pacote lidR no experimento 1 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Experimento 1	
Parâmetros	Hd (m)
Média	11,07
Desvio Padrão	4,74
Mínimo	2,00
Máximo	34,74
Número de árvores	308

Percebe-se que utilizando esse pacote para a extração de métricas, o número de árvores identificadas (308) foi menor do que o número real (431). Os outros valores também divergiram dos valores reais obtidos por meio de inventário florestal convencional.

Para testar a viabilidade das métricas geradas utilizando o pacote lidR, foram calculados os coeficientes de correlação entre a altura medida em campo (Hc) e a altura obtida por meio do pacote (Hd), bem como a transformação dessa variável (Tabela 12).

Tabela 12 – Correlação entre a altura medida em campo e a altura obtida por meio do processamento das imagens do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Variáveis	Correlação			Variáveis	Correlação		
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3		Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
Hd	0,3679	-0,0447	-0,4079	Ln(Hd ³)	0,1963	0,0036	-0,4393
Hd ²	0,4802	-0,0901	-0,3750	Ln(Hd ⁴)	0,1963	0,0036	-0,4393
Hd ³	0,5273	-0,1319	-0,3442	Ln(Hd ⁵)	0,1963	0,0036	-0,4393
Hd ⁴	0,5338	-0,1698	-0,3179	Ln(1/Hd)	-0,1963	-0,0036	0,4393
Hd ⁵	0,5200	-0,2037	-0,2975	Ln(1/Hd ²)	-0,1963	-0,0036	0,4393
1/Hd	-0,0277	-0,0541	0,4658	Ln(1/Hd ³)	-0,1963	-0,0036	0,4393
1/Hd ²	0,0868	-0,1056	0,4847	Ln(1/Hd ⁴)	-0,1963	-0,0036	0,4393
1/Hd ³	0,1486	-0,1572	0,4954	Ln(1/Hd ⁵)	-0,1963	-0,0036	0,4393
1/Hd ⁴	0,1781	-0,2075	0,4985	Hd ^{1/2}	0,2866	-0,0209	-0,4240
1/Hd ⁵	0,1913	-0,2557	0,4957	Hd ^{1/3}	0,2571	-0,0128	-0,4292
Ln(Hd)	0,1963	0,0036	-0,4393	Hd ^{1/4}	0,2420	-0,0087	-0,4318
Ln(Hd ²)	0,1963	0,0036	-0,4393	Hd ^{1/5}	0,2329	-0,0063	-0,4333

Onde: Hd = Altura total, em metros, obtidas pelo processamento das imagens aéreas; Ln = logaritmo neperiano.
Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Percebe-se que no bloco 1 as melhores correlações foram com as variáveis Hd³ e Hd⁴ (0,5273 e 0,5338 respectivamente). Já no bloco 2, as variáveis analisadas não obtiveram boas

correlações com a altura (Hc). Por fim, no bloco 3 as variáveis 1/Hd4 e 1/Hd5 (0,4985 e 0,4957 respectivamente) foram as que apresentaram melhores correlações com a variável altura (Hc).

4.3.2 ITCsegment

Por meio do pacote *itcSegment* foi possível obter diversas métricas, como área de copa, diâmetro de copa, biomassa acima do solo e diâmetro à altura do peito. Porém para esse estudo não foi necessário utilizar a área de copa e a biomassa acima do solo. Na Tabela 13, estão apresentadas as estatísticas descritivas do experimento 1.

Tabela 13 - Estatísticas descritivas dos dados proveniente do processamento com o pacote *itcSegment* no experimento 1 do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Experimento 1			
Parâmetros	H (m)	DAP (cm)	DC (m)
Média	10,88	7,37	3,05
Desvio Padrão	4,32	6,49	8,55
Mínimo	2,31	0,17	0,00
Máximo	20,21	32,26	86,41
Número de árvores	213		

Onde: H = Altura total, em metros; DAP = Diâmetro à altura do peito, em centímetros; DC = Diâmetro de copa, em metros. Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Da mesma maneira que o pacote *lidR*, utilizando esse pacote para a extração de métricas, o número de árvores identificadas foi menos que a metade do número real (431). Os outros valores também divergiram dos valores reais obtidos por meio de inventário florestal convencional.

Para testar a viabilidade das métricas geradas utilizando o pacote *itcSegment*, foram criadas equações utilizando como variáveis dependentes a altura (Hc) e o diâmetro de copa (DCc). Já como variáveis independentes, foram utilizadas as alturas das árvores obtidas com o voo do VANT (Hd), os diâmetros à altura do peito (DAPd) e os diâmetros de copa (DCd) obtidos por meio das imagens aéreas. Nas Tabela 14 e 15, estão as melhores equações obtidas por meio do procedimento *stepwise* e as respectivas estatísticas.

Tabela 14 – Melhores equações, utilizando o pacote itcSegment, para a estimativa da altura das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Bloco	Nº	Equações	Coefficientes	R ² aj	Erro	BIAS	Correlação	RQEM	MDA
1	1	$Hc = \beta_0 + \beta_1 * DAPd + \beta_2 * DAPd^4 + \beta_3 * DCd^5$	$\beta_0 = 21,72$ $\beta_1 = -1,53$ $\beta_2 = 0,01$ $\beta_3 = -0,34$	0,84	0,69	0	0,97	2,18	0,33
1	2	$Hc = \beta_0 + \beta_1 * (1/DAPd) + \beta_2 * (1/DCd^3) + \beta_3 * (1/DCd^4)$	$\beta_0 = 16,77$ $\beta_1 = 56,64$ $\beta_2 = -56,14$ $\beta_3 = 31,25$	0,99	0,15	0	1,00	0,49	0,08
1	3	$Hc = \beta_0 + \beta_1 * (1/DAPd^2) + \beta_2 * (1/DCd^3)$	$\beta_0 = 19,80$ $\beta_1 = 115,98$ $\beta_2 = -23,82$	0,93	0,46	0	0,98	1,77	0,25
2	4	$Hc = \beta_0 + \beta_1 * DAPd^4 + \beta_2 * DCd^3 + \beta_3 * DCd^5$	$\beta_0 = 16,23$ $\beta_1 = 0,00$ $\beta_2 = 0,13$ $\beta_3 = 0,00$	0,75	0,69	0	0,95	2,67	0,26
2	5	$Hc = \beta_0 + \beta_1 * DAPd^5 + \beta_2 * DCd^5$	$\beta_0 = 16,47$ $\beta_1 = 0,00$ $\beta_2 = 0,00$	0,79	0,63	0	0,94	2,96	0,34
2	6	$Hc = \beta_0 + \beta_1 * (1/DAPd) + \beta_2 * (1/DAPd^2) + \beta_3 * (1/DAPd^4) + \beta_4 * (DCd/5)$	$\beta_0 = -654,84$ $\beta_1 = 12836,79$ $\beta_2 = -65733,16$ $\beta_3 = 613009,35$ $\beta_4 = 83,78$	0,99	0,09	0	1,00	0,26	0,02
3	7	$Hc = \beta_0 + \beta_1 * DCd + \beta_2 * DCd^2 + \beta_3 * DCd^3 + \beta_4 * DCd^4 + \beta_4 * DCd^5$	$\beta_0 = 45,32$ $\beta_1 = -126,31$ $\beta_2 = 142,04$ $\beta_3 = -54,03$ $\beta_4 = 6,35$	0,96	0,4	0	1,00	1,18	0,14
3	8	$Hc = \beta_0 + \beta_1 * (DAPd/2) + \beta_2 * (1/DCd) + \beta_3 * (1/DCd^2) + \beta_4 * (1/DCd^3)$	$\beta_0 = -284,83$ $\beta_1 = 17,43$ $\beta_2 = 919,16$ $\beta_3 = -1082,16$ $\beta_4 = 429,00$	0,99	0,15	0	1,00	0,45	0,05

Onde: Hc = Altura total, em metros; DAPd = Diâmetro à altura do peito (1,30 m), em centímetros, obtidos pelo processamento das imagens aéreas; DCd = Diâmetro de copa, em metros, obtidos pelo processamento das imagens aéreas; β_i = Coeficientes; R²aj. = Coeficiente de determinação ajustado; RQEM = Raiz quadrada do erro médio; MDA = Média das diferenças absolutas. Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Utilizando como variável independente o diâmetro à altura do peito (DAPd) e o diâmetro de copa (DCd) obtidos por meio das imagens aéreas, dentre as equações selecionadas, percebe-se que a melhor equação para o bloco 1 foi a de número 2, por possuir as melhores

estatísticas, com R^2_{aj} de 0,99 e erro de 0,15. Já para o bloco 2, a melhor é a equação 6, com um R^2_{aj} de 0,99 e erro de 0,09. Para o bloco 3, a melhor equação é a última que apresentou R^2_{aj} de 0,99 e erro de 0,15. Os resíduos das equações com melhor desempenho (2, 6 e 8) estão apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Análise de resíduos, utilizando o pacote itcSegment, para a estimativa da altura das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

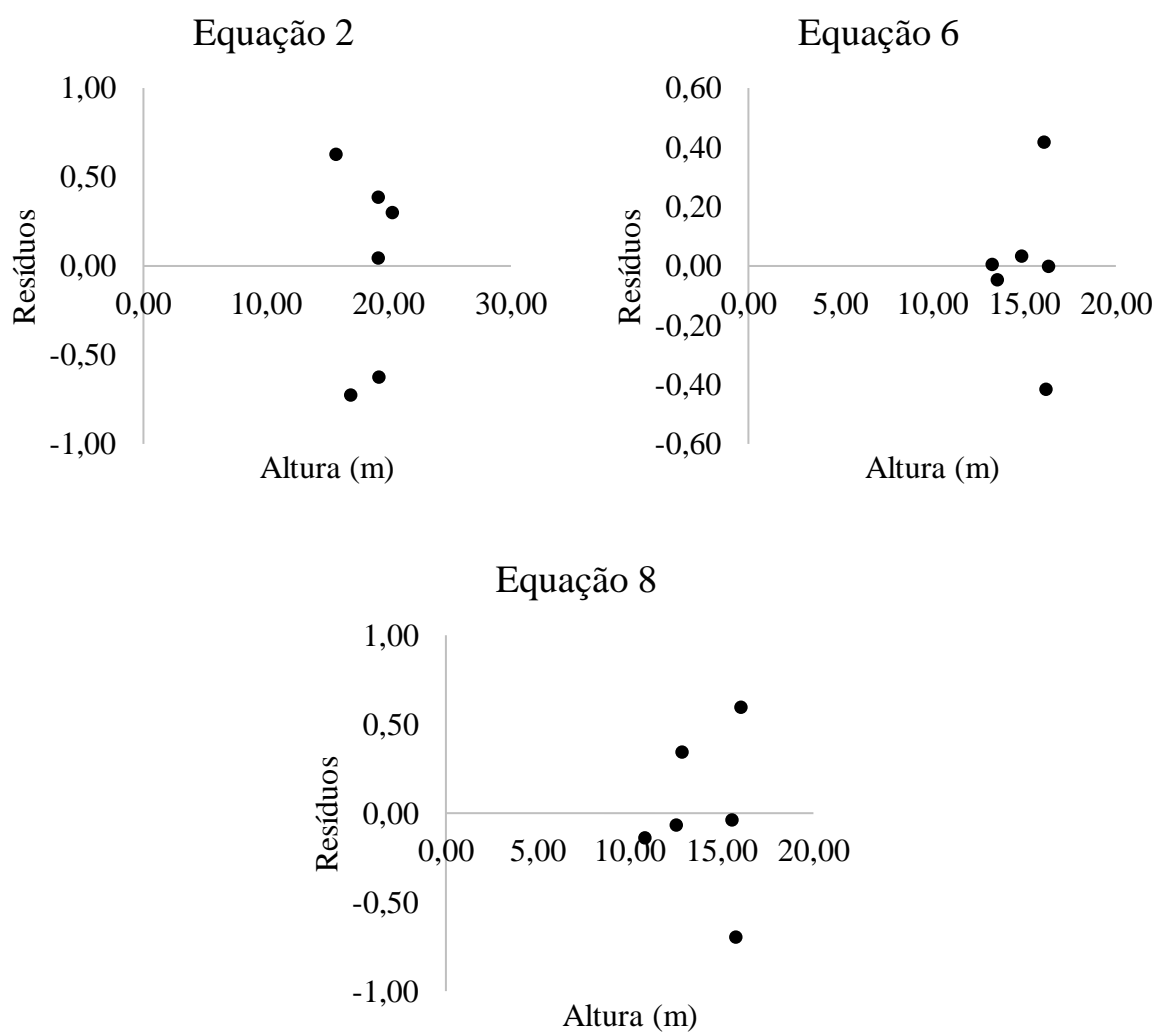


Tabela 15 – Melhores equações, utilizando o pacote itcSegment, para a estimativa do diâmetro de copa das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

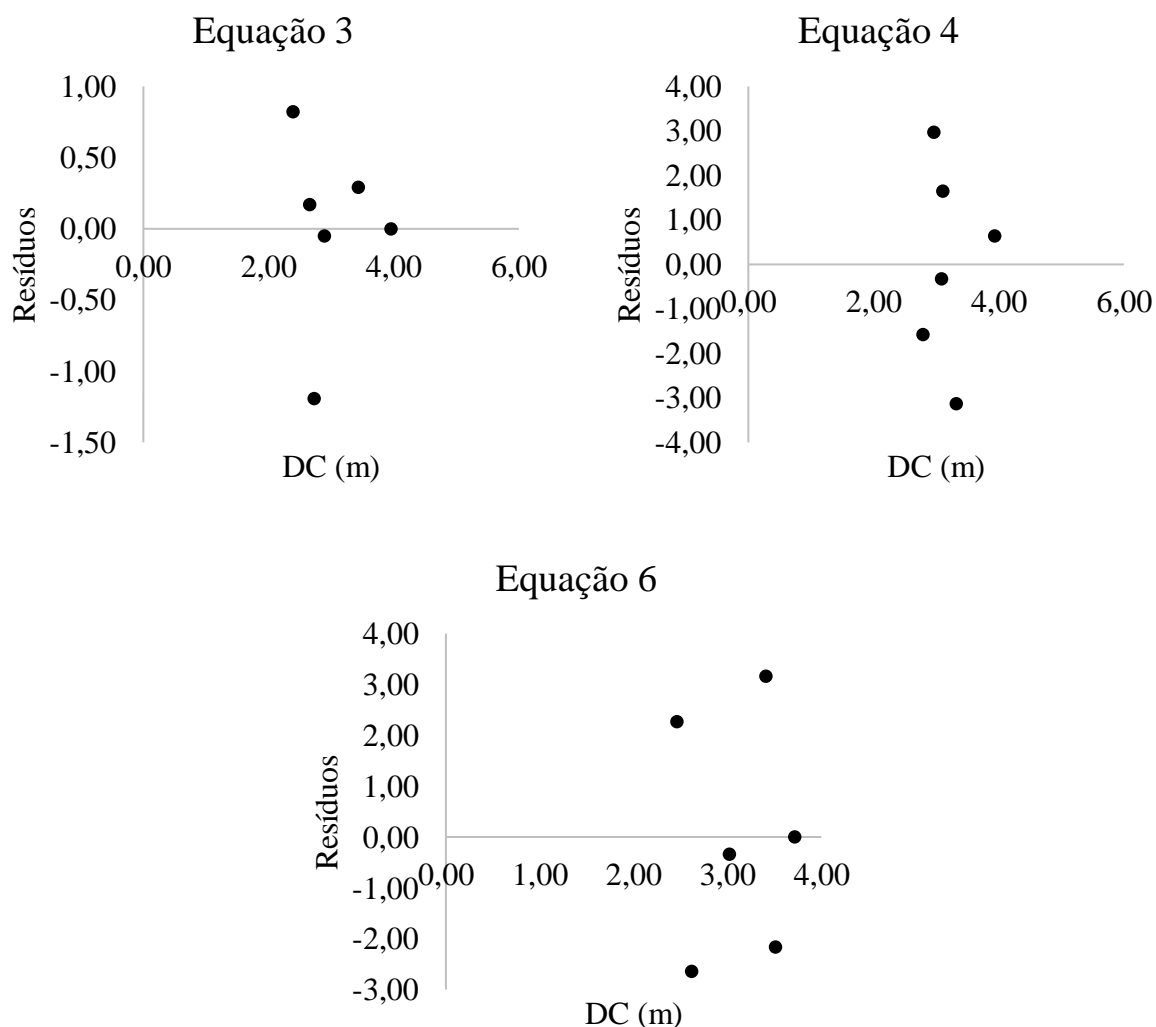
Bloco	Nº	Equações	Coefficientes	R ² aj	Erro	BIAS	Correlação	RQEM	MDA
1	1	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * Hd^3 + \beta_2 * Hd^4 + \beta_3 * DAPd^5$	$\beta_0 = 1,86$ $\beta_1 = 0,01$ $\beta_2 = 0,00$ $\beta_3 = 0,00$	0,95	0,13	0	0,99	2,47	0,06
1	2	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * (1/Hd^5) + \beta_2 * 1/DAPd + \beta_3 * 1/DAPd^5$	$\beta_0 = 5,30$ $\beta_1 = -141452,76$ $\beta_2 = -35,33$ $\beta_3 = 150,63$	0,76	0,28	0	0,95	5,44	0,13
1	3	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * Hd^{1/2} + \beta_2 * DAPd^2 + \beta_3 * DAPd^4 + \beta_4 * DAPd^5$	$\beta_0 = -2,68$ $\beta_1 = 2,31$ $\beta_2 = -0,34$ $\beta_3 = 0,00$ $\beta_4 = 0,00$	0,99	0,04	0	1,00	0,54	0,01
2	4	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * Hd + \beta_2 * Hd^2 + \beta_3 * DAPd^5$	$\beta_0 = -23,33$ $\beta_1 = 4,97$ $\beta_2 = -0,23$ $\beta_3 = 0,00$	0,93	0,11	0	0,99	1,98	0,05
2	5	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * 1/Hd + \beta_2 * 1/DAPd^4 + \beta_3 * 1/DAPd^5$	$\beta_0 = -6,42$ $\beta_1 = 141,23$ $\beta_2 = -13028,36$ $\beta_3 = 32536,76$	0,91	0,81	0	0,98	2,18	0,05
3	6	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * DAPd + \beta_2 * DAPd^2 + \beta_3 * DAPd^3$	$\beta_0 = 6,42$ $\beta_1 = -2,20$ $\beta_2 = 0,36$ $\beta_3 = -0,01$	0,95	0,11	0	0,99	2,07	0,05
3	7	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * 1/Hd + \beta_2 * 1/DAPd^4 + \beta_3 * 1/DAPd^5$	$\beta_0 = 3,84$ $\beta_1 = -221,35$ $\beta_2 = 503,91$	0,87	0,18	0	0,96	4,15	0,1

Onde: DCc = Diâmetro de copa, em metros, medido em campo; DAPd = Diâmetro à altura do peito (1,30 m), em centímetros, obtido pelo processamento das imagens aéreas; Hd = Altura total, em metros, obtida pelo processamento das imagens aéreas; β_i = Coeficientes; R²aj. = Coeficiente de determinação ajustado; RQEM = Raiz quadrada do erro médio; MDA = Média das diferenças absolutas. Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Para a estimativa do diâmetro de copa (DCc) utilizando como variável independente o diâmetro à altura do peito (DAPd) e a altura (Hd) obtidos por meio das imagens aéreas, dentre as equações selecionadas, percebe-se que a melhor equação para o bloco 1 foi a terceira, por possuir as melhores estatísticas, com R²aj. de 0,99 e erro de 0,04. Já para o bloco 2, a melhor equação foi a de número 4 que apresentou R²aj. de 0,93 e erro de 0,11. Para o bloco 3, a melhor

equação é a de número 6 que apresentou R^2_{aj} de 0,95 e erro de 0,11. Os resíduos das equações com melhor desempenho (3, 4 e 6) estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Análise de resíduos, utilizando o pacote itcSegment, para a estimativa do diâmetro de copa das árvores do plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.



Todas as equações provenientes do pacote do itcSegment, apresentaram o BIAS ideal igual a zero e correlações maiores que 0,9, demonstrando que há uma alta afinidade ou dependência das variáveis dependentes e independentes com o modelo testado.

Em relação aos gráficos de resíduos, percebe-se que para as melhores equações houve normalidade na distribuição dos resíduos, não sendo observado tendências de superestimativa ou subestimativa.

Os dois pacotes do software R apresentaram bons resultados em relação as métricas florestais e, apesar de detectarem menos indivíduos e valores diferente dos reais, foram capazes de proporcionar equações com bons parâmetros para a estimativa de variáveis dendrométricas. Isso facilita os processos de inventário florestais e torna a o uso de VANT uma alternativa viável às medições dos parâmetros florestais.

Esses resultados podem ser influenciados por alguns fatores ambientais, ou do sítio, que expressam as condições da floresta. Nesse estudo a intensidade dos ventos foi fator que dificultou a obtenção de resultados mais precisos. Em estudos realizados por Ota et al. (2017) e por Hentz (2018), utilizando dados de sensores passivos embarcados em VANT, também foi observada a influência desses fatores.

Existem diversos estudos sobre a extração de informações estruturais de árvores por VANT fotogrametria. Zarco-Tejada et al. (2014) analisaram as imagens de infravermelho próximo de oliveiras obtidas por VANTs de asa fixa, realizadas em construção 3D pelo software Pix4UAV (empresa suíça Pix4D), e obteve informações sobre a altura das árvores da construção da imagem DSM, que teve boa correlação com as árvores medidas no solo ($R^2 = 0,83$ e $RMSE = 35$ cm). Ni et al. (2015) obtiveram imagens aéreas florestais através de um VANT multi-rotor, reconstruídas as imagens tridimensionais da nuvem de pontos com Agisoft Photoscan, compararam e analisaram o CHM fotogramétrico e o LiDAR CHM, e descobriram que a floresta em escala de solo era altamente correlacionada ($R^2 = 0,87$ e $RMSE = 1,9$ m). Porém nenhuma dessas pesquisas obtiveram equações para a estimativa de variáveis dendrométricas, como altura total e diâmetro à altura do peito com valores de R^2 aj. maiores que 0,9 e erros baixos.

Dalla Corte et al. (2020), utilizando dados de nuvem de pontos de densidade obtidos por meio de VANT com sensor LiDAR, estimaram DAP e H. Esses autores obtiveram um coeficiente de correlação de 0,77 e 0,91 para as variáveis DAP e H, respectivamente. Em comparação com a abordagem baseada em LiDAR, a presente pesquisa forneceu resultados precisos com uma solução de baixo custo utilizando técnicas de SfM.

5. CONCLUSÕES

Os dados obtidos por meio do VANT, apresentam grande potencial para proporcionar informações das florestas e demonstra ser uma importante técnica a ser incluída em etapas de inventário florestal. A capacidade de capturar imagens de alta resolução, mesmo na presença de nuvens, aumenta comparativamente a qualidade dos dados em relação aos satélites tradicionais de observação da Terra. Assim, as perspectivas de pesquisa podem ser expandidas para detecção de características em nível de árvore e monitoramento da saúde da floresta. Particularmente, o surgimento de sensores modernos e plataformas interligadas são oportunidades de destaque para melhorar o conhecimento da dinâmica florestal.

Os produtos gerados a partir do processamento das imagens de VANT com as configurações de voo aplicadas, como MDS, MDT, CHM e ortomosaico, apresentam alta resolução, exatidão adequada de localização e são capazes de fornecerem informações para auxiliar as etapas do inventário florestal. Com isso, espera-se criar metodologia que subsidie inventário florestal convencional, estimando variáveis em um menor tempo de coleta de dados, custo e diminuição de erros amostrais.

A qualidade dos dados obtidos por meio de inventário florestal é fundamental para a veracidade da associação entre as métricas estimadas e os valores reais.

A estimativa de variáveis dendrométricas a partir de dados provenientes de imagens aéreas demonstrou ser viável e as métricas geradas por meio do pacote lidR e itcSegment apresentaram uma correlação positiva entre os valores estimados e os valores medidos em campo. Desse modo, é possível gerar estimativa de variáveis dendrométricas como altura e diâmetro de copa utilizando métricas derivadas de sensores passivos embarcados em VANT. Essas descobertas em termos de cálculo de atributos florestais usando VANT oferecem um futuro promissor no manejo de recursos florestais para silvicultura de precisão.

A extração automatizada de parâmetros estruturais florestais é necessária para avançar em direção à silvicultura de precisão. Os resultados obtidos pela metodologia poderão auxiliar em futuros inventários florestais em plantio de *Eucalyptus* sp., objetivando o manejo florestal sustentável e a silvicultura além de auxiliar empreendimentos na obtenção de dados de suas florestas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. **Measurement**, v.98, p.221–227, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>

ALBA, E. et al. Uso de Imagens de Média Resolução Espacial para o Monitoramento de Dosséis DE *Eucalyptus grandis*. **Scientia Agraria**, v.18, n.4, p.1-8, 2017. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6294984>. Acesso em: 03 nov. 2021.

ALMEIDA, A.C.S. et al. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500013>

ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. Piracicaba, 2004. 133p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/d0f5/5d94ade97c0f67ee307df569fb71c71cadde.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2021.

ANDERSEN, H.E.R.; STEPHEN, E.; MCGAUGHEY, R.J. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.32, n.5, p.355-366, 2006. <https://doi.org/10.5589/m06-030>

ANDERSON, K.; GASTON, K.J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.11, n.3, p.138–146, 2013. <https://doi.org/10.1890/120150>

APIMEC. **Alagoas terá projeto de eucalipto para biomassa energética**. 2015. Disponível em: http://www.apimec.com.br/apimecNE/show.aspx?id_canal=2457&id_materia=3445. Acesso em: 03 nov. 2021.

APOSTOL, B. et al. Height Extraction and Stand Volume Estimation Based on Fusion Airborne LiDAR Data and Terrestrial Measurements for a Norway Spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] Test Site in Romania. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v.44, n.1, p.313-323, 2016. <https://doi.org/10.15835/nbha44110155>

AUGUSTYNCZIK, A.L. et al. Avaliação do tamanho de parcelas e de intensidade de amostragem em inventários florestais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 361-

368, 2013. Disponível em: <https://www.ipef.br/PUBLICACOES/SCIENTIA/nr99/cap07.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2021.

BATISTA, J.L.F.; COUTO, H.T.Z. DO.; FILHO, D.F.S. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas**. 1 ed., São Paulo: oficina de textos, 2014.

BERTOLA, A. **Eucalipto - 100 anos de Brasil, “falem mal, mas continuem falando de mim!”**. 2004. Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/>. Acesso em: 04 nov. 2021.

BOLTE, A. et al. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v.24, n.6, p.473-482, 2009. <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>

BONNET, S.; LISEIN, J.; LEJEUNE, P. Comparison of UAS photogrammetric products for tree detection and characterization of coniferous stands detection and characterization of coniferous stands. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 19, p. 5310-5337, 2017. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1338839>

BONNOR, G.M. Stem diameter estimates from crown width and tree height. **The Commonwealth Forestry Review**, p.8-13, 1968. <https://www.jstor.org/stable/42603649>

BRAGG, D.C. Accurately Measuring the Height of (Real) Forest Trees. **Journal of Forestry**, v.112, n.1, p.51-54, 2014.

BRUCE, A.; BRUCE, P. **Estatística Prática para Cientistas de Dados**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=b0mvDwAAQBAJ&lpg=PP1&ots=xtiVdnjt5W&dq=BRUCE%2C%20A.%20BRUCE%2C%20P.%20Estat%2C%20Pr%C3%ADstica%20Pr%C3%A1tica%20para%20Cientistas%20de%20Dados&lr&hl=pt-BR&pg=PR4#v=onepage&q=BRUCE,%20A.:%20BRUCE,%20P.%20Estat%2C%20Pr%C3%ADstica%20para%20Cientistas%20de%20Dados&f=false>. Acesso em: 03 fev. 2022.

BULLOCK, S.H. Development patterns of tree dimensions in a Neotropical deciduous forest. **Biotropica**, v.32, n.1, p.42-52, 2000. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00446.x>

CAI, S. et al. Improving the estimation of canopy cover from UAV-LiDAR data using a pit-free CHM-based method. **International Journal of Digital Earth**, v.14, n.10, p.1477-1492, 2021. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1766362>

CARDIL, A. et al. Quantifying pine processionary moth defoliation in a pine-oak mixed forest using unmanned aerial systems and multispectral imagery. **Plos One**, v.14, n.3, p.e0213027, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213027>

CASTRO, R.V.O. et al. Feasibility of wood production according to productivity class and rotation criteria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, e00778, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00778>

CATERINA, G.L. **Curvas de crescimento de *Eucalyptus* spp. em plantios de diferentes espaçamentos**. 2017, 82p. Tese (Doutorado em Agronomia) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/150124>. Acesso em: 04 nov. 2021.

CHAO, H.; CHEN, Y. **Remote Sensing and Actuation Using Unmanned Vehicles**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

CHIANUCCI, F. et al. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.47, p.60-68, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.005>

CORONA, P. et al. Contribution of large-scale forest inventories to biodiversity assessment and monitoring. **Forest Ecology and Management**, v.262, p.2061–2069, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.044>

CRUZ, S.C.S. et al. Adubação nitrogenada para o milho cultivado em sistema plantio direto, no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.1, p.62-68, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000100009>

CUNHA, U.S. **Dendrometria e Inventário Florestal**: Série técnica adaptada para atender ao módulo de dendrometria no curso técnico em manejo florestal. Escola Agrotécnica federal de Manaus, Manaus, 2004.

CUNLIFFE, A.M.; BRAZIER, R.E.; ANDERSON, K. Ultra-fine grain landscape- scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry. **Remote Sensing of Environment**, v. 183, p. 129-143, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.019>

CURTO, R.A. et al. Exatidão de métodos para estimativa do volume de árvores em pé em sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta. **Revista Brasileira de Biometria**, v.37, n.3, p.324-334, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i3.399>

DALLA CORTE, A.P. et al. Measuring individual tree diameter and height using GatorEye High-Density UAV-Lidar in an integrated crop-livestock-forest system. **Remote Sensing**, v.12, n.5, p.863, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12050863>

DANDOIS, J.P.; ELLIS, E.C. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. **Remote sensing**, v.2, n.4, p.1157-1176, 2010. <https://doi.org/10.3390/rs2041157>

DANDOIS, J.P.; ELLIS, E.C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Remote Sensing of Environment**, v.136, p.259-276, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005>

DASH, J.P. et al. Early detection of invasive exotic trees using UAV and manned aircraft multispectral and LiDAR Data. **Remote Sensing**, v.11, n.15, p.1812, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11151812>

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). ICA 100-12. Regras do Ar. 2016. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, nº 182, 24 out. 2016.

DINIZ, F.S. **Métodos de amostragem e geoestatística aplicados ao inventário florestal**. 2007, 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, 2007. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/4983/1/DISSERTACAO_M%C3%A9todos%20de%20amostragem%20e%20geoestat%C3%ADstica%20aplicados%20ao%20invent%C3%A1rio%20florestal.pdf. Acesso em: 03 nov. 2021.

ELKAIM, G.H.; LIE, F.A.P.; GEBRE-EGZIABHER, D. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs. **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles**, p.347–380, 2015. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.294.7295&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 04 nov. 2021.

FAHLSTROM, P.G.; GLEASON, T.J. **Introduction to UAV Systems**. 4. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, Incorporated, 2012.

FALKOWSKI, M.J. et al. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.32, n.2, p.153-161, 2006. <https://doi.org/10.5589/m06-005>

FANKHAUSER, K.E.; STRIGUL, N.S.; GATZIOLIS, D. Augmentation of traditional forest inventory and Airborne laser scanning with unmanned aerial systems and photogrammetry for forest monitoring. **Remote Sensing**, v.10, n.10, p.1562, 2018.
<https://doi.org/10.3390/rs10101562>

FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M. et al. Using unmanned aerial vehicles in postfire vegetation survey campaigns through large and heterogeneous areas: Opportunities and challenges. **Sensors**, v. 18, n. 2, p. 2-17, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18020586>

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. São Paulo, 2005.

FIORENTIN, L.D. et al. Quantificação e modelagem da biomassa e carbono da regeneração natural em área de Floresta Ombrófila Mista. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 251-267, 2015. Disponível em:
http://jaguar.fcav.unesp.br/RME/fasciculos/v33/v33_n2/A9_Luan_AnaPaula.pdf. Acesso em: 05 nov. 2021.

FITZ, P.R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

FONSTAD, M.A. et al. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. **Earth Surface Processes Landforms**, v. 38, n. 4, p. 421-430, 2013. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>

FRANCEZ, L.M.B. et al. **Manual para análise de inventário florestal e equação de volume em projetos de manejo florestal sustentável – PMFS**. Secretaria do Meio Ambiente, Belém, 2010, 66 p.

FRANKLIN, S.E.; AHMED, O.S. Deciduous tree species classification using object-based analysis and machine learning with unmanned aerial vehicle multispectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v.39, n.15-16, p.5236-5245, 2018.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1363442>

FREITAS, T. P. et al. Correlações entre as características dendrométricas, anatômicas e densidade básica da madeira de *Liquidambar* sp. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 21, p. 660-669, 2015. Disponível em:
<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2015b/agrarias/correlacoes%20entre%20as%20caracteristicas.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2022.

GENNARO, S.F. et al. An automatic UAV based segmentation approach for pruning biomass

estimation in irregularly spaced chestnut orchards. **Forests**, v.11, n.3, p.308, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11030308>

GIANNETTI, F. et al. A new set of DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data. **Remote Sensing of Environment**, v.213, p.195-205, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.016>

GÓMEZ, C. et al. Modeling forest structural parameters in the mediterranean pines of central Spain using QuickBird-2 imagery and classification and regression tree analysis (CART). **Remote Sensing**, v.4, n.1, p.135-159, 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4010135>

GONÇALVES, J.L.M. et al. *Eucalyptus* plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v.79, n.3, p.169-183, 2017. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415>

GOODBODY, T.R.H. et al. Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. **The Forestry Chronicle**, v.93, n.01, p.71-81, 2017. <https://doi.org/10.5558/tfc2017-012>

GOODBODY, T.R.H.; COOPS, N.C.; WHITE, J.C. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: a review of opportunities, challenges, and future directions. **Current Forestry Reports**, v.5, n.2, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>

GOTTSCHALK, K.W.; MACFARLANE, W.R. **Photographic Guide to Crown Condition of Oaks: Use for Gypsy Moth Silvicultural Treatments**. Gen. Tech. Rep. NE-168. Radnor, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 8 p., v.168, 1993.

GRAÇA, N.L.S.D.S., MITISHITA, E.A; GONÇALVES, J.E. Use of UAV platform as an autonomous tool for estimating expansion on invaded agricultural land. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.23, n.3, p.509-519, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702017000300034>

GRANSHAW, S. I. Photogrammetric Terminology: Third Edition. **Photogrammetric Record**, v. 31, n. 154, p. 210–252, 2016. <https://doi.org/10.1111/phor.12146>

GRZNÁROVÁ, A. et al. The crown diameter estimation from fixed wing type of UAV imagery. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v.42, p.337-341, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-337-2019>

GUEDES, I.C.L. et al. Spatial continuity of dendrometric characteristics in clonal cultivated *Eucalyptus* sp. throughout the time. **Cerne**, v.21, n.4, p.527–534, 2015. Disponível em: <https://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/1101/862>. Acesso em: 02 nov. 2021.

GUERRA-HERNANDEZ, J. et al. Using high resolution UAV imagery to estimate tree variables in *Pinus pinea* plantation in Portugal. **Forest Systems**, v.25, n.2, p.16, 2016. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2016252-08895>

GUIMARÃES, V.M. **Influência do espaçamento em primeira e segunda rotação de eucalipto manejado sob regime de curta rotação**. 2019, 30f. TCC (Graduação em Engenharia Florestal) — Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Ciências Agrárias, Jataí, 2019. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/bitstream/ri/19259/6/TCCG%20-%20Engenharia%20Florestal%20-%20Vitor%20Moreira%20Guimar%c3%a3es%20-%202019.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2022.

GUPTA, S.G.; GHONGE, M.M.; JAWANDHIYA, D.P.M. Review of Unmanned Aircraft System (UAS). **International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)**, v.2, n.4, p.1646-1658, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mangesh-Ghonge/publication/249998592_Review_of_Unmanned_Aircraft_System_UAS/links/02e7e51e8ef1668ce8000000/Review-of-Unmanned-Aircraft-System-UAS.pdf. Acesso em: 04 nov. 2021.

HELMER, E.H. et al. **Characterizing Tropical Forests with Multispectral Imagery**. Land Resources: Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing Handbook vol. 2. v.2, p.367–396, 2015.

HEMERY, G.E.; SAVILL, P.S.; PRYOR, S.N. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. **Forest ecology and management**, v.215, n.1-3, p.285-294, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.016>

HAKAMADA, R.E. et al. Uso do inventário florestal e da uniformidade entre árvores como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em plantios clonais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v.43, n.105, p.27-39, 2015. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr105/cap03.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2021.

HENTZ, A.M.K. **Obtenção de informações dendrométricas para inventário florestal automatizado por meio de veículo aéreo não tripulado (VANT)**. 2018, 238f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/60697>. Acesso em: 01 nov. 2021.

HUNG, C.; BRYSON, M.; SUKKARIEH, S. Multi-class predictive template for tree crown detection. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 68, p.170- 183, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.009>

HUSCH, B.; MILLER, C.I; KERSHAW, J. **Forest mensuration**. 4. ed. New Jersey: John Willey e Sons, Inc, 2003. 443 p.

HYYPPÄ, J. et al. Using individual tree crown approach for forest volume extraction with aerial images and laser point clouds. In: **Proceedings of The ISPRS Workshop Laser Scanning 2005**, p.144-149, 2005. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.222.917&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 03 nov. 2021.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual Ibá 2020**. São Paulo: Café Art, 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba-2020.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2021.

IGLHAUT, J. et al. Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. **Current Forestry Reports**, v. 5, n. 3, p. 155-168, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>

JOHANSEN, K.; RAHARJO, T.; MCCABE, M.F. Using multispectral UAV imagery to extract tree crop structural properties and assess pruning effects. **Remote Sensing**, v.10, n.6, p.854, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10060854>

JUCKER, T. et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. **Global Changing Biology**, v.23, n.1, p.177-190, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcb.13388>

KAARTINEN, H. et al. An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning. **Remote Sensing**, v.4, n.4, p.950-974, 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4040950>

KANE, V.R. et al. Assessing fire effects on forest spatial structure using a fusion of Landsat and airborne LiDAR data in Yosemite National Park. **Remote Sensing of Environment**, v.151, p.89-101, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.041>

KERSHAW JR, J.A. et al. **Forest Mensuration**, 5. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd Registered, 2016.

KOH, L.P.; WICH, S.A. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. **Tropical Conservation Science**, v. 5, n. 2, p. 121- 132, 2012. <https://doi.org/10.1177/194008291200500202>

KOMÁREK, J.; KLOUČEK, T.; PROŠEK, J. The potential of Unmanned Aerial Systems: A tool towards precision classification of hard-to-distinguish vegetation types? **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.71, p.9-19, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.003>

LARRINAGA, A.R.; BROTONS, L. Greenness Indices from a Low-Cost UAV Imagery as Tools for Monitoring Post-Fire Forest Recovery. **Drones**, v.3, n.1, p.6, 2019. <https://doi.org/10.3390/drones3010006>

LAURIN, G.V. et al. Tree height in tropical forest as measured by different ground, proximal, and remote sensing instruments, and impacts on above ground biomass estimates. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.82, p.101899, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101899>

LIANG, X. et al. In-situ measurements from mobile platforms: An emerging approach to address the old challenges associated with forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.143, p.97-107, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.019>

LIMA, G.C. **Comparação de diferentes métodos de cubagem de madeira de povoamento de *Pinus taeda* L. na Região Serrana de Santa Catarina**. 2015, 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade estadual de Santa Catarina, Lages, 2015. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1482/Disserta_o_Gean_Carlos_Paia_Lima_15683965874865_1482.pdf. Acesso em: 03 fev. 2022.

LIMA, M.C.D. **Efeito da borda na precisão do inventário florestal e na estimativa de multiprodutos em um povoamento de eucalipto**. 2017, 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2017. Disponível em: <http://www2.uesb.br/ppg/ppgciflor/wp-content/uploads/2020/08/MAIDA-CYNTHIA-DUCA-DE-LIMA.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2021.

LISEIN, J. et al. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. **Forests**, v.4, n.4, p.922-944, 2013. <https://doi.org/10.3390/f4040922>

LISEIN, J. et al. Discrimination of deciduous tree species from time series of unmanned aerial system imagery. **PLoS One**, v.10, n.11, p.e0141006, 2015.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141006>

LIU, G. et al. Estimating Individual Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data at Plot Level. **Forests**, v.9, n.7, p.398, 2018.
<https://doi.org/10.3390/f9070398>

LOCKS, C.J.; MATRICARDI, E.A.T. Estimativa de impactos da extração seletiva de madeiras na Amazônia utilizando dados LIDAR. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 481-495, 2019. <https://doi.org/10.5902/1980509826007>

LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, L.J. Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, n.76, p.429-438, 2013. Disponível em:
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/102721/1/ImportanciaVersatilidade.pdf>.
Acesso em: 02 nov. 2021.

MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, p. 316, 2009.

MAES, W.H. et al. Can UAV-based infrared thermography be used to study plant-parasite interactions between mistletoe and Eucalypt trees? **Remote Sensing**, v.10, n.12, p.2062, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10122062>

MALTAMO, M.; NÆSSET, E.; VAUHKONEN, J. **Forestry Applications of Airborne Laser Scanning**; Managing Forest Ecosystems; Springer Netherlands: Dordrecht, The Netherlands, 2014; Volume 27, ISBN 978-94-017-8662-1.

MARCATTI, G.E. et al. GIS-based approach applied to optimizing recommendations of *Eucalyptus* genotypes. **Forest ecology and management**, v.392, p.144-153, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.03.006>

MATESE, A. et al. Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. **Remote Sensing**. v.7, n.3, p.2971–2990, 2015.
<https://doi.org/10.3390/rs70302971>

MCCLELLAND, M.P.; VAN AARDT, J.; HALE, D. Manned aircraft versus small unmanned aerial system—Forestry remote sensing comparison utilizing lidar and structure-from-motion for forest carbon modeling and disturbance detection. **Journal of Applied Remote Sensing**, v.14, n.2, p.022202, 2019. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.022202>

- MENESES, P.R.; ALMEIDA, T de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- MEUNIER, I.M.J.; SILVA, J.A.A.; FERREIRA, R.L.C. **Inventário florestal: programas de estudo**. Imprensa Universitária da UFRPE, 2001.
- MICHEZ, A. et al. Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial system. **Environmental monitoring and assessment**, v.188, n.3, p.1-19, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4996-2>
- MIRANDA, A.I. et al. Avaliação da exposição da vinha duriense ao ozono em clima presente e futuro. **Revista Captar: Ciência e Ambiente para Todos**, v. 8, n. 2, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.34624/captar.v8i2.1096>
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 111p.
- MURTA JÚNIOR, L.S. et al. Características dendrométricas de eucalipto submetido a desbaste. **Scientia Forestalis**, v.48, n.127, p.e2948, 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.22>
- NEWNHAM, G.J. et al. Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. **Current Forestry Reports**, v. 1, n. 4, p. 239-251, 2015.
- NI, W. et al. Evaluation of UAV-Based Forest Inventory System Compared with Lidar Data. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 26–31 July 2015; pp. 3874–3877. doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326670.
- NUNES, G.M.; VIEIRA, D.J.E.; CARVALHO, S.P.C. Avaliação preliminar de dados obtidos por VANT em talhão florestal clonal de *Eucalyptus urograndis* H13 no estado de Mato Grosso. In: Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal, 6, 2014, Curitiba. **Anais...**Curitiba: UFPR, v 1, p. 211-218.
- O'HARA, K.L. Stand structure and growing space efficiency following thinning in an even-aged Douglas-fir stand. **Canadian Journal of Forest Research**, v.18, n.7, p.859-866, 1988. <https://doi.org/10.1139/x88-132>

OLIVERIA, C.M.M. et al. Modelo 3-PG na previsão do potencial produtivo de áreas para plantios comerciais de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, v.28, n.1, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509831580>

OTA, T. et al. Aboveground biomass estimation using structure from motion approach with aerial photographs in a seasonal tropical forest. **Forests**, v.6, n.11, p.3882-3898, 2015. <https://doi.org/10.3390/f6113882>

OTA, T. et al. Forest structure estimation from a UAV-Based photogrammetric point cloud in managed temperate coniferous forests. **Forests**, v.8, n.9, p.4–13, 2017. <https://doi.org/10.3390/f8090343>

OTSU, K. et al. Calibrating the severity of forest defoliation by pine processionary moth with landsat and UAV imagery. **Sensors**, v.18, n.10, p.3278, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18103278>

PÁDUA, L. et al. Post-fire forestry recovery monitoring using high-resolution multispectral imagery from unmanned aerial vehicles. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v.42, p.301-305, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-301-2019>

PÁDUA, L. et al. UAS, sensors, and data processing in agroforestry: A review towards practical applications. **International journal of remote sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2349-2391, 2017. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1297548>

PANAGIOTIDIS, D. et al. Determining tree height and crown diameter from highresolution UAV imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.38, n.8-10, p.2392–2410, 2017. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>

PANEQUE-GÁLVEZ, et al. Small drones dor Community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical áreas. **Florests**, v. 5, n. 6, p. 1481 – 1507, 2014. <https://doi.org/10.3390/f5061481>

PARK, J.Y. et al. Quantifying leaf phenology of individual trees and species in a tropical forest using unmanned aerial vehicle (UAV) images. **Remote Sensing**, v.11, n.13, p.1534, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11131534>

PEINHOPF, C. **Determinação de variáveis dendrométricas de *Eucalyptus urograndis* com dados LiDAR aerotransportado**. 2012, 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual do Centro Oeste, 2012. Disponível em:

https://www.lareferencia.info/vufind/Record/BR_df6082e3a8efc07f08c7e6b51d79a728.
Acesso em: 04 nov. 2021.

PERTILLE, C.T. et al. Biomass quantification of *Pinus taeda* L. from remote sensor data. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v.6, n.2, p.603-610, 2019.
<http://dx.doi.org/10.34062/afs.v6i2.7086>

PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. **Manual for Building Tree Volume and Biomass Allometric Equations from Filed Measurement to Prediction**; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 2012.

PULITI, S. et al. Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories. **Remote Sensing Environment**, v.194, p.115-126, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.019>

PULITI, S. et al. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v.7, n.8, p.9632-9654, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70809632>

RANGO, A. et al. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 033542, 2009. <https://doi.org/10.1117/1.3216822>

RODRIGUES, G.S.S.C. et al. **Eucalipto no Brasil: expansão gráfica e impactos ambientais**. Uberlândia: Composer, 2021.

RODRIGUES, W.G. **Predição de diâmetros e cálculo de volume de clones de eucalipto: uma abordagem com redes multi layer perceptron e long-short term memory**. 2019, 93f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/10005>. Acesso em: 03 fev. 2022.

SALAMÍ, E.; BARRADO, C.; PASTOR, E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. **Remote Sensing**, v.6, n.11, p.11051-11081, 2014.
<https://doi.org/10.3390/rs6111051>

SANQUETTA, C.R et al. **Inventários Florestais: planejamento e execução**. 3 ed. Curitiba: Multi-Graphic Gráfica e editora, 2014.

SANTAMARIA, E. et al. Reconfigurable automated behavior for UAS applications. **Aerospace Science na Technology**, v.23, n.1, p.372-386, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.09.005>

SANTOS, D.V. **Extração semiautomática da orientação de descontinuidades com modelo tridimensional de taludes obtido por fotogrametria digital**. 2017. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/2707>. Acesso em: 04 nov. 2021.

SCHNEIDER, P.R.; SCHNEIDER, P.S.P.; SOUZA, C.A.M. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. 2. ed. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2009. 294 p.

SCOLFORO, H.F. et al. Modeling dominant height growth of *Eucalyptus* plantations with parameters conditioned to climatic variations. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 182–195, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.001>

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**, lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

SEREGHETTI, G.C. et al. Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energia na Agricultura**, v.30, n.3, p.257–262, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Guilherme-Sereghetti/publication/284223800_EFFECT_OF_SPACING_ON_Eucalyptus_urophylla_x_Eucalyptus_grandis_GROWTH_AND_WOOD_BASIC_DENSITY_IN_SHORT_CYCLE/link/s/5658974c08ae1ef9297de5b2/EFFECT-OF-SPACING-ON-Eucalyptus-urophylla-x-Eucalyptus-grandis-GROWTH-AND-WOOD-BASIC-DENSITY-IN-SHORT-CYCLE.pdf. Acesso em: 04 nov. 2021.

SILVA, F.A. et al. Caracterização de índices morfométricos para *Araucaria angustifolia* plantada na Região Norte do Rio Grande do Sul. **Advances in Forestry Science**, v.4, n.3, p.143-146, 2017. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/5111>. Acesso em: 10 nov. 2021.

SILVA, J.A.A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos de Dendrometria**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciências Florestais, 1979, 191 p.

SILVA, I.P.; SILVA, J.A.A. Métodos estatísticos aplicados à pesquisa científica: uma abordagem para profissionais da pesquisa agropecuária. **Recife: UFRPE**, 2002, viii, 305 p.

SMITH, M.W.; CARRIVICK, J.L.; QUINCEY, D.J. Structure from motion photogrammetry in physical geography. **Progress in Physical Geography**, v.40, n.2, p.247-275, 2016.
<https://doi.org/10.1177/0309133315615805>

SOARES, C.P.B.; NETO, F.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e Inventario Florestal**. Viçosa: Editora UFV, 2006. 276p.

SPATHELF, P. et al. Adaptive measures: Integrating adaptive forest management and forest landscape restoration. **Annals of Forest Science**, v.75, n.55, p.1-6, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>

SPURR, S.H. et al. Photogrammetry and photo-interpretation. **Soil Science**, v.90, n.6, p.380, 1960. Disponível em:
https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1960/12000/Photogrammetry_and_Photo_Interpretation.12.aspx. Acesso em: 05 nov. 2021.

SOBRINHO, M.F.O. et al. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) para mensuração de processos florestais. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 15, n. 27, p. 117-129, 2018. Disponível em:
<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2018a/agrar/uso%20de%20veiculos%20aereos.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2021.

TANG, L.; SHAO, G. Drone remote sensing for forestry research and practices. **Journal of Forestry Research**, v.26, n.4, p.791-797, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>

THENKABAIL, P.S. **Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing**; CRC Press Inc, London, UK, 2015.

TONKIN, T.N.; MIDGLEY, N.G. Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. **Remote Sensing**, v.8, n.9, p.786, 2016.
<https://doi.org/10.3390/rs8090786>

TORRESAN, C. et al. Forestry applications of UAVs in Europe: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2427-2447, 2017.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>

- TORRES-SÁNCHEZ, J. et al. High- Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology. **Plos one**, v.10, n.6, p.e0130479, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>
- TOTH, C.; JÓZKÓW, G. Remote sensing platforms and sensors: a survey. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.115, p.22–36, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>
- UBIALI, J.A. et al. Comparação de métodos e processos de amostragem para estudos fitossociológicos e estimativas de estoque de uma floresta ecotonal na Região Norte Matogrossense. **Floresta**, v.39, n.3, p.511-523, 2009. <http://dx.doi.org/10.5380/RF.v39i3.15351>
- VAN LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest Mensuration**. Springer Science & Business Media, 2007.
- VANTROBA, A.P. et al. Características morfométricas e dendrocronológicas de *Zanthoxylum rhoifolium* Lam em fragmento de Floresta Ombrófila Mista Aluvial. **Scientia Forestalis**, v.48, n.127, p.e3338. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.10>
- WAITE, C.E. et al. A view from above: Unmanned aerial vehicles (UAVs) provide a new tool for assessing liana infestation in tropical forest canopies. **Journal of Applied Ecology**, v.56, n.4, p.902-912, 2019. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13318>
- WALLACE, L. et al. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. **Remote sensing**, v.4, n.6, p.1519-1543, 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4061519>
- WALLACE, L. et al. 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. <https://doi.org/10.3390/f7030062>
- WATZLAWICK, L.F.; BENIN, C.C. Variáveis dendrométricas e produção de *Eucalyptus benthamii* em diferentes espaçamentos. **Colloquium Agrariae**, v.16, n.6, p. 111-120. DOI: 10.5747/ca.2020.v16.n6.a413
- WEST, P.W. **Tree and Forest Measurement**; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015.

WESTOBY, M.J. et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v.179, p.300-314, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

WHITEHEAD, K. et al. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: Scientific and commercial applications. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v.2, n.3, p.86-102, 2014. <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>

WHITEHEAD, K.; HUGENHOLTZ, C.H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: A review of progress and challenges. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v.2, n.3, p.69-85, 2014. <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>

WU, Z. et al. Mapping invasive plant with UAV-derived 3D mesh model in mountain area—A case study in Shenzhen Coast, China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.77, p.129-139, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.12.001>

YANG, Y.; HUANG, S. Allometric modelling of crown width for white spruce by fixed- and mixed-effects models. **The Forestry Chronicle**, v.93, n.2, p.138-147, 2017. <https://doi.org/10.5558/tfc2017-020>

YU, L. et al. Detecting shoot beetle damage on Yunnan pine using Landsat time-series data. **Forests**, v.9, n.1, p.39, 2018. <https://doi.org/10.3390/f9010039>

ZARCO-TEJADA, et al. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (uav) and automatic 3d photo-reconstruction methods. **European Journal of Agronomy**, v.55, p.89–99, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004>

ZELLWEGER, F. et al. Remotely sensed forest structural complexity predicts multi species occurrence at the landscape scale. **Forest Ecology and Management**, v.307, p.303-312, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.023>

ZHANG, D. et al. Estimation of Forest Leaf Area Index Using Height and Canopy Cover Information Extracted From Unmanned Aerial Vehicle Stereo Imagery. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.12, n.2, p.471-481, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8630494>. Acesso em: 03 nov. 2021.

ZHANG, J. et al. Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. **Biological Conservation**, v. 198, p. 60-69, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.03.027>

ZHANG, N. et al. Assessment of defoliation during the *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu disaster outbreak using UAV-based hyperspectral images. **Remote Sensing of Environment**, v.217, p.323-339, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.024>