

Geoinformação e Sensoriamento Remoto em Geografia

Estimativa de variáveis dendrométricas em plantios experimentais de *Eucalyptus* sp. utilizando imagens de VANT

Estimation of dendrometric variables in experimental plantations of *Eucalyptus* sp. using images from UAV

Estimación de variables dendrométricas en plantaciones experimentales de *Eucalyptus* sp. usando imágenes de VANT

Sthefany Nobre¹  , **Emanuel Araujo Silva¹** 

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife , PE, Brasil

RESUMO

O objetivo desse trabalho é estimar variáveis dendrométricas em plantios experimentais de *Eucalyptus* SP. utilizando imagens aéreas obtidas por meio de Veículo Aéreo não Tripulado. A área de estudo fica localizada no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas situado no município de Rio Largo – AL. O levantamento dos dados foi realizado em uma área experimental de povoamento florestal do híbrido *Eucalyptus urograndis* (E. grandis X E. urophylla). A coleta dos dados em campo foi realizada a partir de parcelas da população de eucalipto. Mediu-se a altura total, diâmetro à altura do peito (DAP) e diâmetro de copa 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. Utilizando os arquivos derivados das imagens aéreas, foram testados os pacotes lidR e itcSegment do software R. Por meio dos dados provenientes do inventário florestal e do processamento das imagens obtidas por meio do voo de VANT, foram construídas equações de regressão linear e não linear. 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.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Inventário florestal; Modelagem

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the accuracy of the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based on the structure of motion to support and automate the quantification of dendrometric variables in

experimental plantations of *Eucalyptus* sp. The study area is located on 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 an experimental area of a forest stand of the hybrid *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophylla*). Field data collection was carried out on portions of the *Eucalyptus* population. 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. Using files derived from aerial images, the lidR and itcSegment packages of the R software were tested. Using the data from the forest inventory and the processing of the images obtained through the UAV flight, linear and non-linear regression equations were constructed. The two R software packages presented good results in relation to forest metrics, and despite detecting fewer individuals and values different from the real ones, they were able to provide equations with good parameters for the prediction of dendrometric variables. This facilitates forest inventory processes and makes the use of UAVs a viable alternative to varying forest configurations.

Keywords: Remote sensing; Forest inventory; Modeling

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estimar variables dendrométricas em plantaciones experimentales de *Eucalyptus* sp. utilizando imágenes aéreas obtenidas mediante Vehículo Aéreo no Tripulado. El área de estudio está ubicada em el Campus de Ingeniería y Ciencias Agrícolas de la Universidad Federal de Alagoas ubicada em el municipio de Rio Largo – AL. La recolección de datos se realizo em un área experimental de masas forestales para el híbrido *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophylla*). La recolección de datos em el campo se llevó a cabo a partir de porciones de la población de eucaliptos. Se midió la altura total, el diámetro a la altura del pecho (DAP) y el diámetro de copa de todos los individuos de cada parcela. Para obtener las imágenes aéreas se utilizo un VANT DJI Phantom 4 PRO com cámara RGB. Utilizando archivos derivados de imágenes aéreas, se probaron los paquetes lidR e itcSegment del software R. A partir de los datos del inventario forestal y del procesamiento de las imágenes obtenidas mediante el vuelo del VANT, se construyeron ecuaciones de regresión lineales y no lineales. Los dos paquetes de software R presentaron buenos resultados en relación a las métricas forestales y, a pesar de detectar menos individuos y valores diferentes a los reales, lograron proporcionar ecuaciones con buenos parámetros para la estimación de variables dendrométricas. Esto facilita los procesos de inventario forestal y convierte el uso de vehículos aéreos no tripulados em una alternativa viable a la medición de parámetros forestales.

Palabras-clave: Detección remota; Inventario forestal; Modelado

1 INTRODUÇÃO

A quantificação de variáveis dendrométricas e alométricas é uma das principais atividades em um inventário florestal. Existem diferentes métodos para predição dessas variáveis, tais como a mensuração, por meio de métodos diretos (destrutivos) e métodos indiretos, utilizando técnicas de amostragem ou sensoriamento remoto (Fiorentin *et al.*, 2015; Pertille *et al.*, 2019).

O avanço das técnicas de sensoriamento remoto possibilitou o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), aplicados no campo do mapeamento e na estimativa das propriedades biofísicas das florestas. Diversas informações relacionadas à estrutura florestal podem ser obtidas por meio de técnicas de sensoriamento remoto em um curto período de tempo e sob várias condições de acessibilidade (Puliti *et al.*, 2015).

Os VANTs possuem capacidade de voos em baixas altitudes e baixas velocidades, permitindo a coleta de dados próximos à Terra, além disso, podem ser equipados com diversos sensores, como câmeras digitais, possibilitando a captura de imagens com resolução espacial ultra-alta (1 a 20 cm) (Witehead; Hugenholtz, 2014; Zhang *et al.*, 2016). Ao utilizar esses sistemas e os softwares de processamento correspondentes, torna-se possível gerar modelos tridimensionais (3D) empregados em diversas aplicações florestais (Tudoran *et al.*, 2021).

A análise de imagens digitais, em conjunto com técnicas de fotointerpretação, viabiliza a avaliação dos principais parâmetros do povoamento (Voroventii, 2010). Os valores dos parâmetros, obtidos a partir de modelos digitais e produtos ortorretificados, situam-se dentro de níveis de tolerância aceitáveis ($\pm 10\%$) ao serem comparados com medições in-situ (Zagalikis *et al.*, 2005).

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.

Porém, apesar de todas as vantagens proporcionadas pelas abordagens de sensoriamento remoto, a estrutura do povoamento continua sendo um dos principais fatores que impactam os aspectos da seleção do instrumento ou da precisão da medição. Dentro das opções de sensoriamento remoto disponíveis, destaca-se recentemente o algoritmo de visão computacional Estrutura de Movimento (SfM) (Furukawa; Ponce, 2010), que tem demonstrado uma notável melhoria na eficiência na construção de conjuntos de dados 3D extremamente densos e precisos. Essas nuvens de pontos 3D exibem uma qualidade comparável aos métodos tradicionais baseados em laser (Wallace *et al.*, 2016). Quando aplicado a imagens de alta resolução capturadas por VANTs, o SfM tem revelado sua capacidade de gerar modelos de altura

do dossel (CHM). Esses modelos mostraram-se eficazes na estimativa precisa da altura total das árvores em inventários florestais, como evidenciado por estudos anteriores (Goodbody *et al.*, 2017; Panaglotidis *et al.*, 2017; Tudoran *et al.*, 2021).

À vista disso, no contexto das determinações ao nível da árvore, os VANTs se apresentam como um sistema eficaz para estimar variáveis biométricas. No que diz respeito às limitações da técnica VANT-SfM, é notável que nem todas as árvores de um povoamento são visíveis nos modelos digitais de superfície (MDSs) resultantes, o que implica que os cálculos são aplicados exclusivamente às árvores de nível superior ou a indivíduos isolados (Tudoran *et al.*, 2021).

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 desse trabalho é estimar variáveis dendrométricas em plantios experimentais de *Eucalyptus* sp. utilizando imagens aéreas obtidas por meio de Veículo Aéreo não Tripulado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo fica localizada em um plantio experimental de 2,5 ha no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas situado no 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 1441 mm. O solo do local é classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso Argissólico, de textura média/argilosa e declividade inferior a 2% (Almeida *et al.*, 2008).

2.2 Características do experimento

O levantamento dos dados foi realizado em uma área experimental de povoamento florestal do híbrido *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophylla*), clones I144 e VE41. O plantio foi em agosto de 2017 com três blocos, cada bloco com seis parcelas totalizando 18 parcelas com diferentes espaçamentos (3m x 3m, 3m x 4m e 3m x 2m).

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.m⁻² de terra solta do formigueiro, ao longo dos caminhos ou das trilhas próximos aos olheiros ativos, conforme a instrução do fabricante.

2.3 Obtenção de variáveis dendrométricas

A coleta dos dados em campo foi realizada a partir de parcelas da população de eucalipto, nesse caso, foram medidas todas as árvores do plantio desconsiderando-se as árvores da bordadura de cada parcela. Dessa maneira, mediu-se a altura total, diâmetro à altura do peito (DAP) e 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 431 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 equação 1:

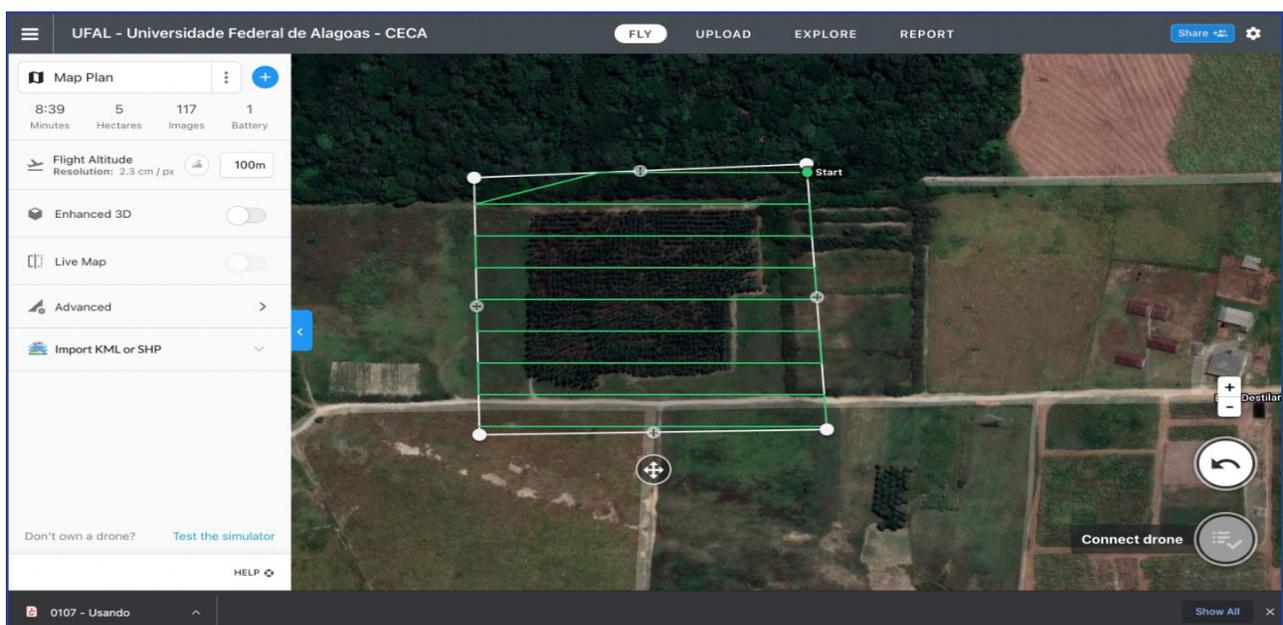
$$H(m) = [\text{tg}(\beta) * d] + [\text{tg}(\alpha) * d] \quad (1)$$

A circunferência a 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 (. Já o diâmetro de copa foi medido com trena, tomando a medida do diâmetro na linha e entre linhas do plantio, sendo posteriormente calculada a média das duas medidas.

2.4 Coleta de dados VANT

Para a obtenção das imagens aéreas foi utilizado o VANT da empresa DJI modelo Phantom 4 PRO com câmera RGB. O planejamento e a execução do plano de voo foram feitos por meio do aplicativo Dronedeploy (Figura 1) 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 1 – 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 12:00 h, 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, 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 GPS de GNSS Trimble RTK R4 model 3 L1/L2 com precisão horizontal de 3 mm e vertical 3,5 mm.

2.5 Processamento das imagens

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 e o CHM oriundos do levantamento de VANT foram testados os pacotes lidR e itcSegment no software R 4.3.1. Esses pacotes permitem extrair árvores individuais e calculam métricas como altura, DAP, diâmetro de copa e até biomassa de todo povoamento, parcela ou árvore.

2.6 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 1, estão apresentadas as transformações das variáveis independentes utilizadas no método stepwise.

Tabela 1 – 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
	$1/Hd, 1/Hd^2, 1/Hd^3, 1/Hd^4, 1/Hd^5$
	$\ln(Hd), \ln(Hd^2), \ln(Hd^3), \ln(Hd^4), \ln(Hd^5)$
	$\ln(1/Hd), \ln(1/Hd^2), \ln(1/Hd^3), \ln(1/Hd^4), \ln(1/Hd^5)$
DAPd	$Hd^{1/2}, Hd^{1/3}, Hd^{1/4}, Hd^{1/5}$
	$DAPd^2, DAPd^3, DAPd^4, DAPd^5$
	$1/DAPd, 1/DAPd^2, 1/DAPd^3, 1/DAPd^4, 1/DAPd^5$
	$\ln(DAPd), \ln(DAPd^2), \ln(DAPd^3), \ln(DAPd^4), \ln(DAPd^5)$
	$\ln(1/DAPd), \ln(1/DAPd^2), \ln(1/DAPd^3), \ln(1/DAPd^4), \ln(1/DAPd^5)$
DCd	$DAPd^{1/2}, DAPd^{1/3}, DAPd^{1/4}, DAPd^{1/5}$
	$DCd^2, DCd^3, DCd^4, DCd^5$
	$1/DCd, 1/DCd^2, 1/DCd^3, 1/DCd^4, 1/DCd^5$
	$\ln(DCd), \ln(DCd^2), \ln(DCd^3), \ln(DCd^4), \ln(DCd^5)$
	$\ln(1/DCd), \ln(1/DCd^2), \ln(1/DCd^3), \ln(1/DCd^4), \ln(1/DCd^5)$
	$DCd^{1/2}, DCd^{1/3}, DCd^{1/4}, DCd^{1/5}$

Fonte: Autores (2022)

Legenda: Hd, Altura total, em metros, obtidas pelo processamento das imagens aéreas; 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

Para estimativa da altura medida em campo (H_c), 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 (H_c) 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 e clones. 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.

2.7 Análise estatística

A comparação entre as equações modeladas utilizando dados advindos de inventário florestal com o auxílio de sensoriamento remoto foi baseada na distribuição gráfica dos resíduos, no coeficiente de correlação, no Bias, na raiz quadrada do erro médio, na média das diferenças absolutas e no coeficiente de determinação ajustado. Os cálculos estatísticos bem como os gráficos foram realizados no software Excel.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dados das imagens aéreas

As características do melhor voo estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características provenientes do melhor voo do VANT no plantio experimental de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas

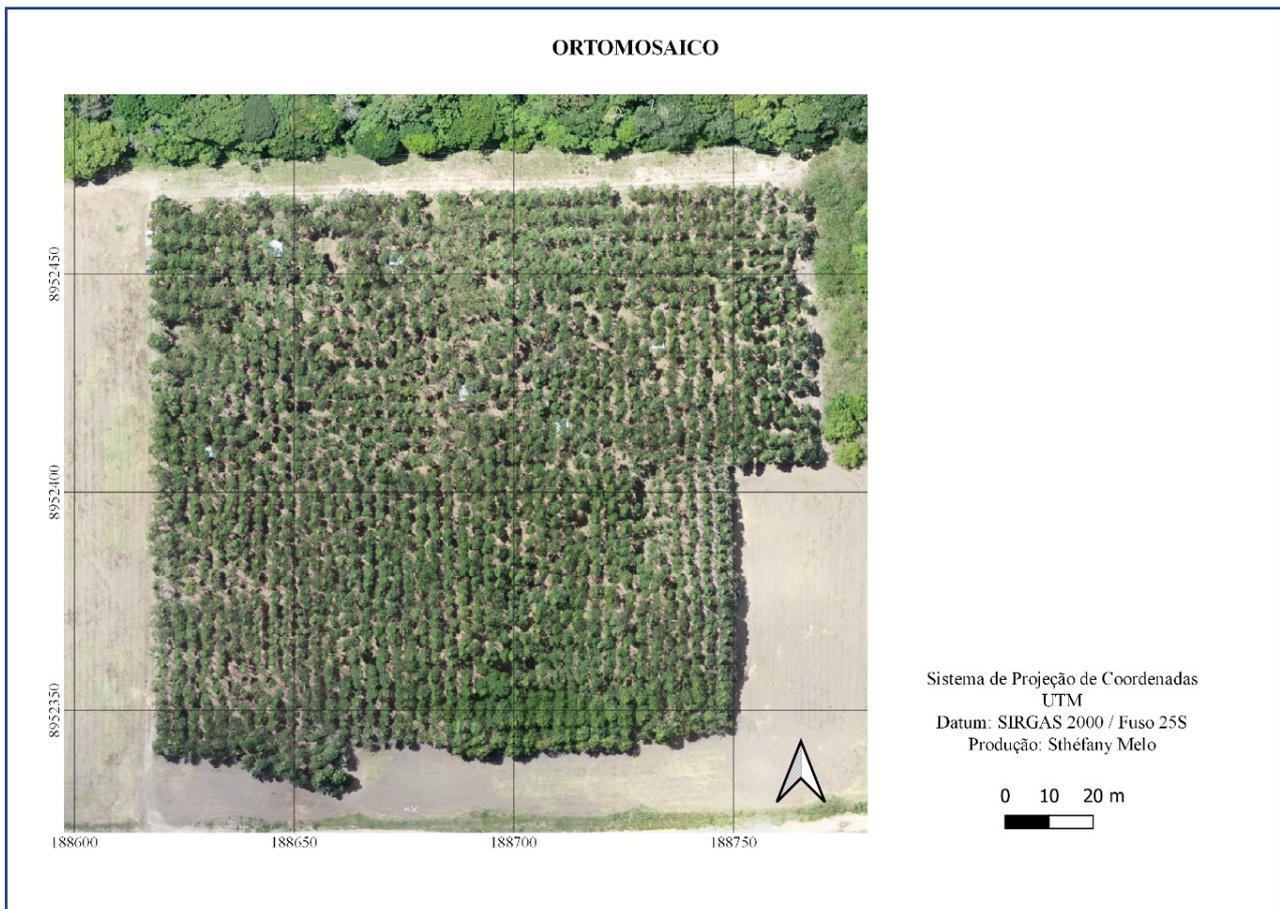
Parâmetros	Valores
Número de imagens	177
Altura do voo	222 m
Resolução	5,31 cm/pix
Área de cobertura	14,6 ha

O processamento das imagens, obtidas por meio do voo de VANT, resultou em vários produtos sendo eles nuvem de pontos, MDS, MDT e em um ortomosaico (Figura 2).

Foram obtidas imagens de alta qualidade, com resultado satisfatório para a realização das demais análises. 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 (Chianucci *et al.*, 2016).

Figura 2 – 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



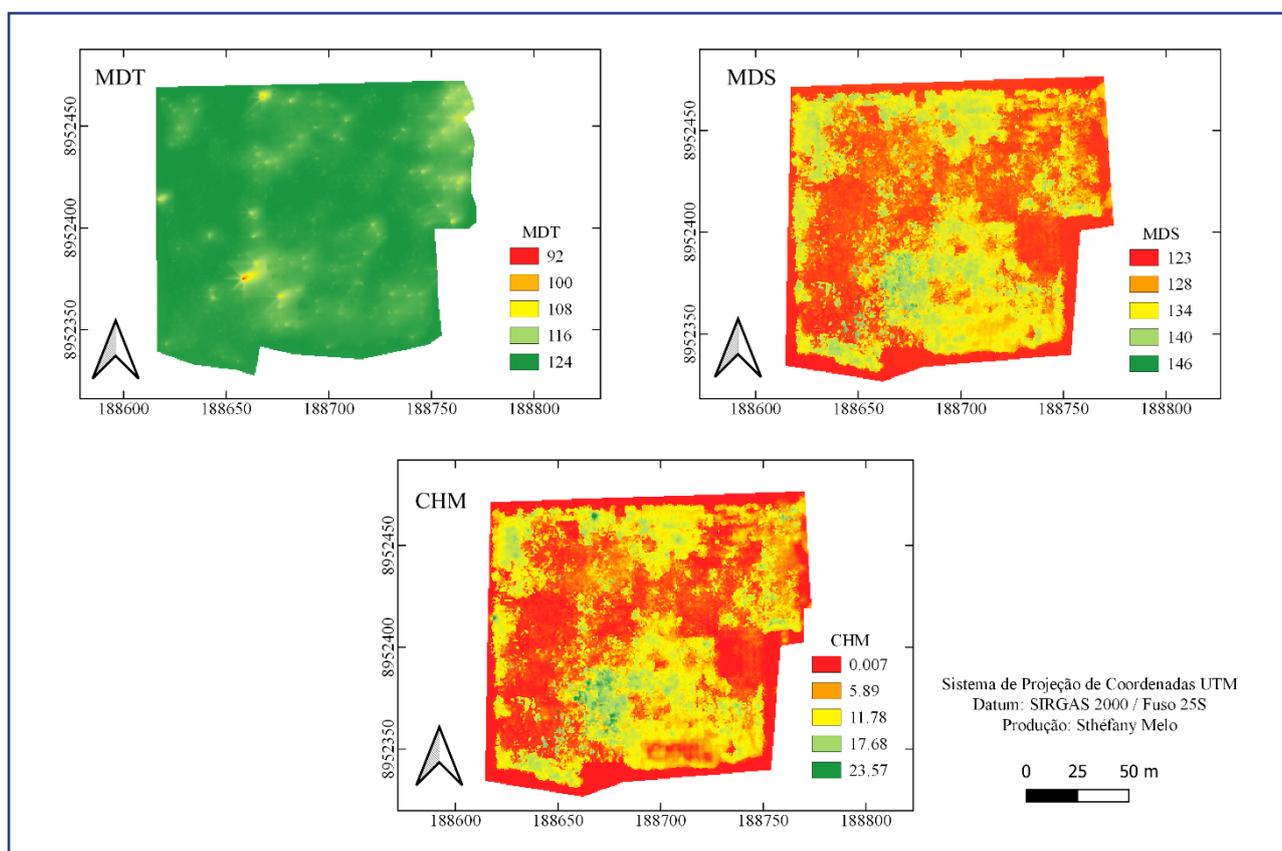
Além disso, Sobrinho *et al.* (2018) consideram ser possível visualizar que a obtenção e o processamento de imagens de obtidas utilizando VANTs vêm se revelando como um meio muito importante para o apoio em obtenção de informações, neste caso, a identificação dos indivíduos de *Eucalyptus* sp. apresentaram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

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) (ZHANG *et al.*, 2016). 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).

Além do ortomosaico também foram gerados os MDT e MDS. A partir desses modelos gerou-se o CHM. Na Figura 3, estão apresentados o MDT, MDS e CHM da área de estudo.

Figura 3 – 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 gerado o MDS, que foi normalizado em um CHM utilizando também o MDT, sendo possível a detecção de árvores e as estimativas de alturas, similar ao mapeamento a laser. O MDT, MDS e CHM produzidos foram importantes para a extração das variáveis dendrométricas altura das árvores, área de copa 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 é possível identificar a quantidade, a altura e o formato de copa de cada árvore emergente e assim, por meio dessa métrica, pode-se observar outros aspectos da floresta como a presença de clareiras (LOCKS; MATRIACARDI, 2019).

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.

3.1 Estimativa de variáveis dendrométricas

3.1.1 LidR

O pacote lidR só possibilita obter a altura das árvores. Na Tabela 3, estão apresentadas as estatísticas descritivas do experimento 1. 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.

Tabela 3 - 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

Fonte: Autores (2022)

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 4).

Tabela 4 - 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

Legenda: Hd, Altura total, em metros, obtidas pelo processamento das imagens aéreas; Ln, logaritmo neperiano

Fonte: Autores (2022)

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).

3.1.2 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 o estudo não foram utilizadas a área de copa e a biomassa acima do solo. Na Tabela 5, estão apresentadas as estatísticas descritivas do experimento 1.

Tabela 5 - 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		

Fonte: Autores (2022)

Legenda: H, Altura total, em metros; DAP, Diâmetro à altura do peito, em centímetros; DC, Diâmetro de copa, em metros.

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 (H_c) e o diâmetro de copa (DC_c). Já como variáveis independentes, foram utilizados a alturas das árvores obtidas com o voo do VANT (H_d), o diâmetro à altura do peito (DAP_d) e o diâmetro de copa (DC_d) obtidos por meio das imagens aéreas. Nas tabelas abaixo, estão as melhores equações obtidas por meio do procedimento *stepwise* e as respectivas estatísticas.

Tabela 6 - Melhores equações, utilizando o pacote itcsegment, para a estimativa da altura das árvores do plantio de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas

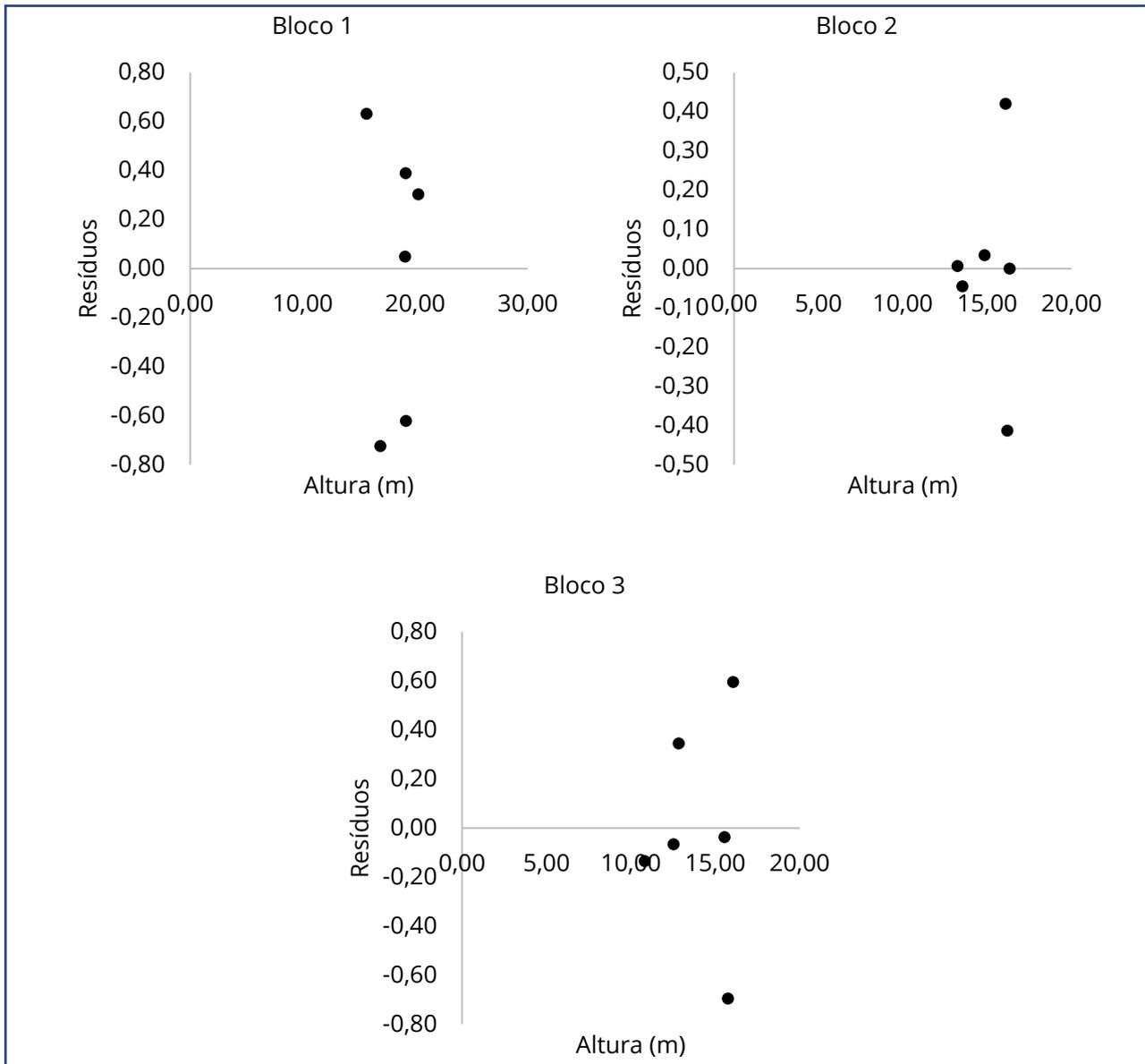
Bloco	Equações	Coefficientes	R ² aj	Erro	BIAS	Correlação	RQEM	MDA
1	$H_c = \beta_0 + \beta_1*(1/DAPd) + \beta_2*(1/DCd^3) + \beta_3*(1/DCd^4)$	$\beta_0 = 16,77$	0,99	0,15	0	1,00	0,49	0,08
		$\beta_1 = 56,64$						
		$\beta_2 = -56,14$						
		$\beta_3 = 31,25$						
2	$H_c = \beta_0 + \beta_1*(1/DAPd) + \beta_2*(1/DAPd^2) + \beta_3*(1/DAPd^4) + \beta_4*(DCd/5)$	$\beta_0 = -654,84$	0,99	0,09	0	1,00	0,26	0,02
		$\beta_1 = 12836,79$						
		$\beta_2 = -65733,16$						
		$\beta_3 = 613009,35$						
3	$H_c = \beta_0 + \beta_1*(DAPd/2) + \beta_2*(1/DCd) + \beta_3*(1/DCd^2) + \beta_4*(1/DCd^3)$	$\beta_0 = -284,83$	0,99	0,15	0	1,00	0,45	0,05
		$\beta_1 = 17,43$						
		$\beta_2 = 919,16$						
		$\beta_3 = -1082,16$						
		$\beta_4 = 429,00$						

Fonte: Autores (2022)

Legenda: H_c, 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.

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 apresentou R²aj. de 0,99 e erro de 0,15. Já para o bloco 2, a melhor equação teve um R²aj. de 0,99 e erro de 0,09. Para o bloco 3, a melhor equação resultou em um R²aj. de 0,99 e um erro de 0,15. Os resíduos das equações com melhor desempenho estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Análise de resíduos das melhores equações para a estimativa da altura das árvores do plantio de eucalipto do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas



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 possui R^2_{aj} de 0,99 e erro de 0,04. Já para o bloco 2, a melhor equação apresentou R^2_{aj} de 0,93 e erro de 0,11. Para o bloco 3, a melhor equação resultou em um R^2_{aj} de 0,95 e um erro de 0,11. Os resíduos das equações com melhor desempenho estão apresentados na Figura 5.

Tabela 7 - 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	Equações	Coefficientes	R ² aj	Erro	BIAS	Correlação	RQEM	MDA
1	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * Hd^{1/2} + \beta_2 * DAPd^2 + \beta_3 * DAPd^4 + \beta_4 * DAPd^5$	$\beta_0 = -2,68$ $\beta_1 = 2,31$ $\beta_2 = -0,34$ $\beta_3 = 0,00$ $\beta_4 = 0,00$	0,99	0,04	0	1,00	0,54	0,01
2	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * Hd + \beta_2 * Hd^2 + \beta_3 * DAPd^5$	$\beta_0 = -23,33$ $\beta_1 = 4,97$ $\beta_2 = -0,23$ $\beta_3 = 0,00$	0,93	0,11	0	0,99	1,98	0,05
3	$DCc = \beta_0 + \beta_1 * DAPd + \beta_2 * DAPd^2 + \beta_3 * DAPd^3$	$\beta_0 = 6,42$ $\beta_1 = -2,20$ $\beta_2 = 0,36$ $\beta_3 = -0,01$	0,95	0,11	0	0,99	2,07	0,05

Fonte: Autores (2022)

Legenda: DAPc = Diâmetro a altura do peito (1,30 m), em centímetros; DAPd, diâmetro a 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; β_i , coeficientes; R²aj., coeficiente de determinação ajustado; RQEM, raiz quadrada do erro médio; MDA, média das diferenças absolutas.

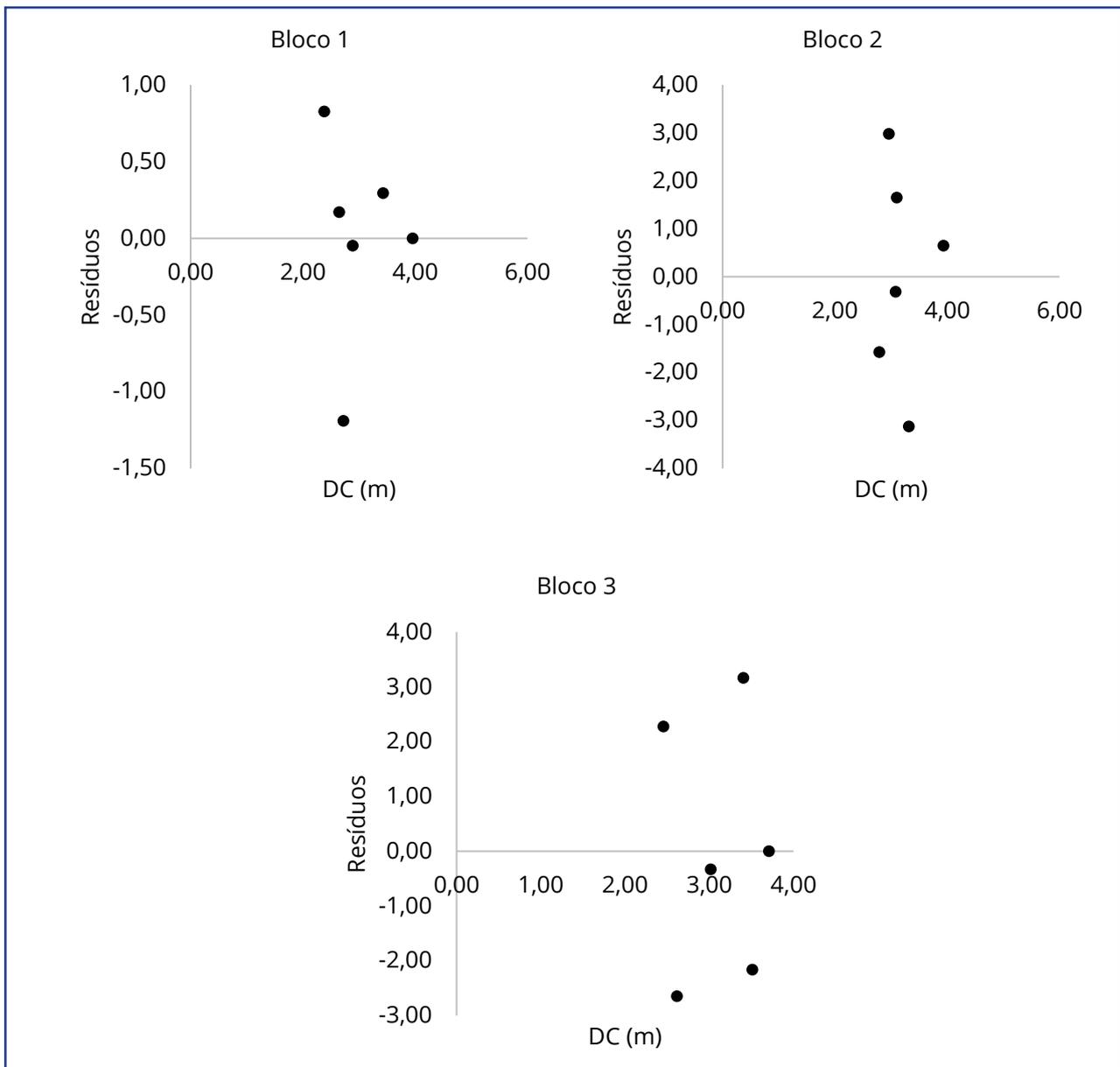
Todas as equações apresentaram o BIAS ideal igual a zero e correlações maiores que 0,9, demonstrando que há uma alta afinidade ou dependência das variáveis dependentes e independentes com o modelo testado. Percebe-se que mesmo tendo uma pequena quantidade de dados, por ser a média das seis parcelas de cada bloco, houve normalidade na distribuição dos resíduos de todas as equações, 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), utilizando dados de sensores passivos embarcados em VANT, também foi observada a influência desses fatores.

Figura 5 - Análise de resíduos das melhores equações 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



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, comparou e analisou 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 a 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.

Dessa forma, as perspectivas dessa 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. 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 operação com o VANT é uma atividade simples que não requer muita experiência, apresenta um grande potencial para proporcionar informações presentes nas florestas e demonstra ser um aliado as etapas de inventário florestal, podendo no futuro substituir algumas atividades.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 estimativa de variáveis dendrométricas a partir de dados provenientes de imagens aéreas demonstrou ser viável e as métricas geradas por meio dos pacotes 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 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.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I. BARBOSA, G. V. S.; FILHO, G. M.; JÚNIOR, R. A. F. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.
- CAI, S. ZHANG, W.; JIN, S.; SHAO, J.; LI, L.; YU, S.; YAN, G. 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.
- CHIANUCCI, F. DISPERATI, L.; GUZZI, D.; BIANCHINI, D.; NARDINO, V.; LASTRI, C.; RINDINELLA, A.; CORONA, P. 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.
- CRUZ, S. C. S.; PEREIRA, F. R. S.; SANTOS, J. R.; ALBUQUERQUE, A. W.; PEREIRA, R. G. Adubação nitrogenada para o milho cultivado em sistema plantio direto, no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 62-68, 2008.
- DALLA CORTE, A. P.; REX, F. E.; ALMEIDA, D. R. A.; SANQUETTA, C. R.; SILVA, C. A.; MOURA, M. M.; WILKINSON, B.; ZAMBRANO, A. M. A.; NETO, E. M. C.; VERAS, H. F. P.; MORAES, A.; KLAUBERG, C.; MOHAN, M.; CARDIL, A.; BROADBENT, E. N. 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.
- FIORENTIN, L. D.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A. 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.
- FURUKAWA, Y.; PONCE, J. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. 32, n. 8, p. 1362-1376, 2010.

GOODBODY, T. R. H.; COOPS, N. C.; MARSHALL, P. L.; TOMPALSKI, P.; CRAWFORD, P. Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. **The Forestry Chronicle**, v. 93, n. 1, p. 71-81, 2017.

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.

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.

NI, W.; LIU, J. ZHANG, Z. SUN, G.; YANG, A. 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; p. 3874–3877.

OTA, T.; OGAWA, M.; MIZOUE, N.; FUKUMOTO, K.; YOSHIDA, S. Forest structure estimation from a UAV-Based photogrammetric point cloud in managed temperate coniferous forests. **Forests**, v. 8, n. 9, p. 4–13, 2017.

PANAGIOTIDIS, D.; ABDOLLAHNEJAD, A.; SUROVY, P.; CHITECULO, V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. **International journal of remote sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2392-2410, 2017.

PERTILLE, C. T.; NICOLETTI, M. F.; TOPANOTTI, L. R.; STEPKA, T. F. Biomass quantification of *Pinus taeda* L. from remote sensor data. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 6, n. 2, p. 603-610, 2019.

PULITI, S.; ORKA, H. O.; GOBAKKEN, T.; NAESSET, E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 9632-9654, 2015.

PULITI, S.; ENE, L. T.; GOBAKKEN, T.; NAESSET, E. Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories. **Remote Sensing Environment**, v. 194, p. 115-126, 2017.

SOBRINHO, M. F. O.; DALLA CORTE, A. P.; VASCONCELLOS, B. N.; SANQUETTA, C. R.; REX, F. E. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) para mensuração de processos florestais. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 15, n. 27, p. 117-129, 2018.

TUDORAN, G. M.; DOBRE, A. C.; CICSĂ, A.; PASCU, I. S. Development of mathematical models for the estimation of dendrometric variables based on unmanned aerial vehicle optical data: A romanian case study. **Forests**, v. 12, n. 2, p. 200, 2021.

VOROVENCII, I. Applying the change vector analysis technique to assess the desertification risk in the south-west of Romania in the period 1984–2011. **Environmental monitoring and assessment**, v. 189, p. 1-18, 2017.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; MALENOVSKY, Z.; TURNER, D.; VOPENKA, P. 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.

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.

ZAGALIKIS, G.; CAMERON, A. D.; MILLER, D. R. The application of digital photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 35, n. 5, p. 1224-1237, 2005.

ZARCO-TEJADA, P. J.; DIAZ-VARELA, R.; ANGILERI, V.; LOUDJANI, P. 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.

ZHANG, J.; HU, J.; LIAN, J.; FIAN, Z.; OUYANG, X.; YE, W. 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.

Contribuições de autoria

1 – Sthefany Nobre

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Mestre em Ciências Florestais

<https://orcid.org/0000-0002-1572-5579> - sthefanynobre.20@gmail.com

Contribuição: Metodologia, Escrita - primeira redação

2 – Emanuel Araujo Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Doutor em Engenharia Florestal

<https://orcid.org/0000-0003-0711-5954> - emanuel.araujo@ufrpe.br

Contribuição: Administração do projeto, supervisão, Escrita - revisão e edição

Como citar este artigo

NOBRE, S.; SILVA, E. A.. Estimativa de variáveis dendrométricas em plantios experimentais de Eucalyptus sp. utilizando imagens de VANT. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v.28, e84504, p. 1-22, 2024. <https://doi.org/10.5902/2236499484504>