



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

LAÍS GONÇALVES PIRES DE SOUZA

**USO DA FOTOGRAMETRIA AÉREA DIGITAL VIA IMAGENS COLETADAS
POR DRONE NO INVENTÁRIO QUANTITATIVO DE UMA FLORESTA
URBANA**

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2023

LAÍS GONÇALVES PIRES DE SOUZA

**USO DA FOTOGRAMETRIA AÉREA DIGITAL VIA IMAGENS COLETADAS
POR DRONE NO INVENTÁRIO QUANTITATIVO DE UMA FLORESTA
URBANA**

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

**JERÔNIMO MONTEIRO - ES
2023**

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

S719u Souza, Laís Gonçalves Pires de, 1995-
Uso da fotogrametria aérea digital via imagens coletadas por drone no inventário quantitativo de uma floresta urbana / Laís Gonçalves Pires de Souza. - 2023.
64 f. : il.

Orientador: Adriano Ribeiro de Mendonça.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Arborização das cidades. 2. Drone. 3. Sensoriamento remoto. I. Mendonça, Adriano Ribeiro de. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. III. Título.

CDU: 630

USO DA FOTOGRAMETRIA AÉREA DIGITAL VIA IMAGENS COLETADAS POR DRONE NO INVENTÁRIO QUANTITATIVO DE UMA FLORESTA URBANA


Laís Gonçalves Pires de Souza

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


Aprovada em 30 de outubro de 2023.

Documento assinado digitalmente
 **CRISTIANE COELHO DE MOURA**
Data: 30/10/2023 19:46:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof^a. Dr^a. Cristiane Coelho de Moura (Examinadora externa)
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE QUINTAO DE ALMEIDA**
Data: 31/10/2023 12:45:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Quintão de Almeida (Examinador externo)
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL MARIAN CALLEGARO**
Data: 30/10/2023 17:00:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Marian Callegaro (Examinador externo)
Universidade Federal do Pampa

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANO RIBEIRO DE MENDONCA**
Data: 01/11/2023 11:57:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço à Deus, pela vida, saúde e sabedoria para conseguir concluir com meu melhor mais esta etapa de minha vida.

Aos meus familiares, meu pai, Adilson e meus irmãos, Leonardo e Aline pela paciência e compreensão. E a minha mãe Sileia, por continuar sendo sempre a estrela no qual eu seguirei.

Ao meu noivo, Ronan, pelo companheirismo, ajuda e por me transmitir calma muitas das vezes e pelo carinho e amor que sempre me deu.

Agradeço aos meus amigos, Lara, Lucas, Millena, Lunalda, Nívea, Carem e Igor, que sempre estavam disponíveis, sendo no trabalho ou nas distrações.

À minha musa inspiradora, Taylor Swift, que por meio de suas músicas consegue me transmitir a paz, calma e concentração que tantas vezes foram necessárias.

Agradeço também a minha equipe e família LaMFlor por todo suporte e conhecimento compartilhado.

A todos os professores que contribuíram de alguma forma para meu conhecimento e por fim agradeço a CAPES, pela bolsa e incentivo à realização desta pesquisa.

Obrigada!

RESUMO

SOUZA, Laís Gonçalves Pires de. **Uso da fotogrametria aérea digital via imagens coletadas por drone no inventário quantitativo de uma floresta urbana.** 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Adriano Ribeiro de Mendonça.

Nas áreas urbanas, as árvores desempenham um papel crucial na alteração da paisagem e do microclima local, além de promoverem o sequestro de carbono e proporcionar espaços de lazer e recreação para a população. No entanto, a inserção e a manutenção das árvores nas cidades são um desafio para a administração local, pois requer conhecimentos ambientais da região, das espécies e do local de implantação. O inventário florestal aprimorado com dados de sensoriamento remoto surge como um facilitador do planejamento urbano, acelerando o processo de inventário das árvores e conseqüentemente a tomada de decisão. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a acurácia da fotogrametria aérea digital (FAD) a partir de imagens coletadas por uma aeronave remotamente pilotada (RPA) na detecção de árvores e na estimação de variáveis biométricas em um inventário florestal urbano. Este foi realizado na Avenida Governador Lindemberg, localizada no município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo. No mesmo período do inventário de campo, imagens de alta resolução espacial foram obtidas por uma RPA de plataforma multirrotor. Em seguida, os indivíduos arbóreos foram identificados automaticamente e suas copas segmentadas a partir de dados 3D de FAD. Por fim, os valores de altura total (H), diâmetro a 1,3 m do solo (D) e diâmetro da copa (d_c) das árvores foram estimados a partir de modelos de regressão ajustados com as métricas de altura da nuvem de pontos 3D. Foram inventariados 144 indivíduos. Para a validação da FAD, os erros encontrados foram de 0,32% para o MDT e de 16,23% para a altura total. Foram identificadas automaticamente 78% dos indivíduos, com o algoritmo de detecção de janela variável (wV), utilizando a nuvem de pontos como fonte de dados. Para a comparação entre os diâmetros de copa, os erros encontrados foram de 17,94%, 21,2% e 29,5% respectivamente para as comparações entre os diâmetros de copa obtidos de forma manual, por meio de imagens da FAD, com as obtidas em campo com quatro raios, oito raios e o

diâmetro obtido de forma automática por meio da identificação e segmentação das copas, nas imagens da FAD. Já para os modelos de regressão, os erros obtidos respectivamente para H , D e d_c foram 8,97%, 36,76% e 15,68%. Por meio do levantamento pode-se identificar de forma automática as árvores e extrair métricas tradicionais que são utilizadas para geração de modelos para obtenção de variáveis de interesse. O MDT obtido gerou um bom resultado para a obtenção da altura das árvores por meio da FAD-RPA. Para a variável diâmetro de copa, dados obtidos de forma manual com imagens da FAD, apresentaram valores considerados satisfatórios, sendo o melhor para esta variável. Além disso, modelos de regressão com as métricas tradicionais obtidas foram satisfatórias para estimação de H e d_c , visto que apresentaram valores de RMSE e R^2 acurados. Caso diferente para o modelo de diâmetro do tronco. Concluiu-se então que a realização de um levantamento aerofotogramétrico da via urbana utilizando uma aeronave remotamente pilotada é executável e pode fornecer dados importantes para a arborização urbana.

Palavras-chave: Arborização urbana, Aeronave remotamente pilotada, Sensoriamento remoto, Mensuração florestal, Regressão múltipla.

ABSTRACT

SOUZA, Laís Gonçalves Pires de. **Use of digital aerial photogrammetry via images collected by drone in the quantitative inventory of an urban forest.** 2023. Dissertation (Master's in degree in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Adriano Ribeiro de Mendonça.

In urban areas, trees play a crucial role in changing the landscape and local microclimate, in addition to promoting carbon sequestration and providing leisure and recreation spaces for the population. However, the establishment and maintenance of trees in cities pose a challenge for local administration, requiring environmental knowledge of the region, species, and deployment location. Currently, forest inventory enhanced with remote sensing data emerges as a facilitator of urban planning, expediting the tree inventory process and, consequently, decision-making. This study aimed to assess the accuracy of digital aerial photogrammetry (FAD) using images collected by a remotely piloted aircraft (RPA) in detecting trees and estimation of biometric variables in an urban forest inventory. The inventory was conducted on Governador Lindemberg Avenue, located in the municipality of Jerônimo Monteiro, Espírito Santo. High spatial resolution images were obtained by a multicopter RPA during the field inventory period. Subsequently, tree individuals were automatically identified, and their canopies were segmented using FAD-3D data. Finally, total height (H), diameter at 1,3m above ground (D), and canopy diameter (d_c) values were estimated from regression models fitted with 3D point cloud height metrics. A total of 144 individuals were inventoried. For FAD validation, errors found were 0,32% for Digital Terrain Model (MDT) and 16,23% for total height. The windowed Variable detection algorithm (wV) using the point cloud as data source automatically identified 78% of individuals. For the comparison of canopy diameters, errors were 17,94%, 21,2% and 29,5% for manual measurements, FAD images, and field measurements with four rays, eight rays, and automatically obtained diameters through canopy identification and segmentation in FAD images, respectively. Regression models errors for H , D and d_c were 8,97%, 36,76% and 15,68% respectively. The survey demonstrated the automatic identification of trees and extraction of traditional metrics for generating models to obtain variables of interest. The MDT obtained provided satisfactory

results for tree height estimation through FAD-RPA. Manual measurements with FAD images were considered satisfactory for canopy diameter, proving to be the best method for this variable. Additionally, regression models with traditional metrics obtained were satisfactory for H and d_c estimation, showing accurate RMSE and R^2 values. However, the trunk diameter model showed different results. In conclusion, conducting an aerial photogrammetric survey of urban areas using a remotely piloted aircraft is feasible and can provide valuable data for urban tree planning.

Keywords: Urban afforestation, Remotely piloted aircraft, Remote sensing, Forest measurement, Multiple regression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma metodológico do estudo.	24
Figura 2. Localização da área de estudo perante ao país, estado e perímetro urbano.	25
Figura 3. MAVIC 2 PRO, aeronave remotamente pilotada (RPA) utilizada no inventário aprimorado.	27
Figura 4. Global Navigation Satellite System (GNSS) utilizado como base, alocado para estabilização.	29
Figura 5. Faixa de pedestre e bueiro utilizados para obtenção dos pontos de controle.	29
Figura 6. Gráficos de dispersão entre (A): altitudes obtidas com RTK e modelo digital do terreno (MDT) e (B): altura total obtida em campo, pelo inventário florestal urbano e na fotogrametria aérea digital (FAD).	39
Figura 7. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo.	40
Figura 8. Ortomosaico gerado por meio das imagens obtidas com a aeronave remotamente pilotada (RPA).	41
Figura 9. Algoritmos de detecção individual de árvores de uma parte da área de estudo.	43
Figura 10. Segmentação automática das copas das árvores em parte da área de estudo.	45
Figura 11. Gráficos dos diâmetros de copa (A): obtidos de forma manual e em campo com 4 raios; (B): de forma manual e em campo com 8 raios; e (C): de forma manual e de forma automática (obtidos pelas métricas tradicionais e segmentação das copas).	47
Figura 12. Gráficos de dispersão entre os valores de H estimados e observados.	51
Figura 13. Gráficos de dispersão entre os valores de D estimados e observados.	51
Figura 14. Gráficos de dispersão entre os valores de d_c estimados e observados.	52
Figura 15. Histograma de frequência de RMSE na validação de modelos para H	52
Figura 16. Histograma de frequência de RMSE na validação de modelos para D	53
Figura 17. Histograma de frequência de RMSE na validação de modelos para d_c	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Raiz do quadrado médio do erro dos pontos de controle.	30
Tabela 2. Métricas tradicionais extraídas da nuvem de pontos da fotogrametria aérea digital (FAD).	35
Tabela 3. Número de indivíduos por espécie encontrados na área de estudo. 37	
Tabela 4. Estatísticas descritivas das variáveis diâmetro à 1,3 m do solo (D), altura total (H) e diâmetro de copa (dc) das árvores inventariadas.	38
Tabela 5. Estatísticas referentes ao erro de medição das variáveis diâmetro à 1,3 metros do solo (D) e altura total (H).	38
Tabela 6. Estatísticas para validação dos produtos da fotogrametria aérea digital (FAD).	39
Tabela 7. Valores obtidos para os algoritmos de detecção das árvores.	42
Tabela 8. Estatísticas para avaliação do diâmetro de copa.	46
Tabela 9. Modelos de regressão múltipla gerados para as variáveis estudadas.	48
Tabela 10. Estatísticas obtidas dos modelos de estimativa para as variáveis estudadas.	49

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Objetivo geral.....	14
1.2	Objetivos específicos	14
2	Revisão de Literatura	15
2.1	Arborização Urbana	15
2.2	Inventário Florestal Urbano.....	17
2.3	Inventário Florestal Aprimorado.....	19
2.3.1	Sensoriamento Remoto.....	20
2.3.2	Fotogrametria.....	22
3	Material e Métodos.....	24
3.1	Área de Estudo	25
3.2	Inventário Florestal Urbano.....	26
3.3	Inventário Florestal Urbano Aprimorado	26
3.3.1	Aquisição de imagens e dos pontos de controle terrestre	27
3.3.2	Processamento das imagens	30
3.3.3	Validação da fotogrametria aérea digital (FAD)	31
3.3.4	Deteção e segmentação das árvores	32
3.3.5	Diâmetro de copa	34
3.3.6	Métricas tradicionais FAD-RPA.....	35
3.3.7	Modelagem das variáveis biométricas	36
4	Resultados e Discussão	37
4.1	Inventário Florestal Urbano.....	37
4.2	Avaliação dos produtos FAD	39
4.3	Deteção individual de árvores (ITD) e segmentação das copas	42
4.4	Avaliação do diâmetro de copa (d_c)	45
4.5	Modelagem das variáveis biométricas	47
5	Conclusões.....	54
6	Referências Bibliográficas	55

1 INTRODUÇÃO

Nos centros urbanos, as árvores são responsáveis por alterar a paisagem e o microclima local, contribuem para o sequestro de carbono e servem como área de lazer e recreação para a população (SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017). No entanto, a inserção de árvores em ambientes urbanos é um desafio para a administração municipal, pois, são necessários estudos prévios das condições do lugar, do ambiente e das espécies florestais, sendo de extrema importância a associação desses três fatores. Para isso, deve-se atentar as características das espécies como altura da árvore, diâmetro do tronco e da copa e sistema radicular (CEMIG, 2011), entre outras. Portanto, a gestão das cidades necessita de um bom planejamento, avaliações constantes dos indivíduos, visto que a dinâmica florestal nestes locais é alta e manejo adequado às condições encontradas é fundamental para uma boa arborização (SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017).

Visando estudar as árvores presentes nas cidades, é comum a realização de inventários florestais. O inventário florestal tradicional, dependendo da área e quantidade de indivíduos a serem estudados, pode ser trabalhoso e de alto custo. Este alto custo faz com que, muitas vezes, o levantamento e/ou o monitoramento não sejam realizados, o que prejudica o bom funcionamento das cidades em relação às árvores, tornando o que seriam benefícios em malefícios (SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017). Deste modo, outras formas de realizar e, ou aprimorar o inventário florestal surgem como alternativas.

Dentre estas formas, o inventário florestal aprimorado surge como um facilitador do planejamento urbano, acelerando o processo de inventário e, conseqüentemente, a tomada de decisão (LINS, 2019). O inventário aprimorado usa técnicas de sensoriamento remoto, como a utilização de dados ópticos orbitais multiespectrais e hiperespectrais, dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ou dados de fotogrametria aérea digital (FAD) (GOODBODY *et al.*, 2017; GOODBODY *et al.*, 2019).

As imagens orbitais multiespectrais permitem a obtenção de características importantes da arborização, como a cobertura da copa e a densidade populacional. O baixo custo é a principal vantagem, já que as imagens, na grande maioria das vezes, são disponibilizadas gratuitamente. No entanto, a principal limitação é a ocorrência de nuvens (GEORGOPOULOS *et al.*, 2022). Com o LiDAR é possível obter dados com significativos detalhes, já que os feixes de luz passam pela copa das árvores e atingem o solo (GONÇALVES *et al.*, 2017), mas sua tecnologia ainda é de alto custo, sendo a principal desvantagem deste método (BISPO, *et al.*, 2020). A FAD é uma alternativa viável, pois, apresenta um menor custo que o LiDAR. Utilizando aeronaves remotamente pilotadas (RPA) é possível obter dados das copas das árvores e em alguns casos, em áreas não muito densas, da superfície do solo em menor tempo comparado a métodos tradicionais e com acurácia desejada.

A utilização do inventário florestal tradicional é comum em pesquisas de arborização urbana. Ferreira (2015) realizou um inventário florestal em um condomínio residencial no município de Foz do Iguaçu, atestando que a utilização da ferramenta foi eficiente para obter dados e avaliar as condições das árvores urbanas das 116 espécies presentes na área. Já Paiva *et al.* (2010) realizaram o inventário florestal e o diagnóstico da arborização urbana viária em Rio Branco (AC), concluindo que a arborização encontrada na área não é satisfatória.

Entretanto, o uso da FAD na arborização urbana ainda é pouco utilizado. No trabalho desenvolvido por Souza (2018), utilizou-se imagens obtidas por um RPA para obter os valores dos índices de cobertura vegetal (ICV) e índice de área verde (IAV) em Volta Redonda, Rio de Janeiro. Estes autores concluíram que a utilização da FAD-RPA na arborização foi uma ferramenta importante no levantamento da arborização, pois, foi possível adquirir imagens de alta resolução e de fácil processamento, com valores de índices semelhantes aos encontrados com dados obtidos em campo. Já Silva *et al.* (2019) mapearam a cobertura florestal na área urbana no município de Alta Floresta no Mato Grosso e concluíram que a utilização da FAD-RPA permitiu o mapeamento da área com grande riqueza de detalhes. No estado do Espírito Santo, trabalhos relacionados com a arborização urbana utilizando FAD-RPA são escassos.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a acurácia da fotogrametria aérea digital (FAD) a partir de imagens coletadas por uma aeronave remotamente pilotada (RPA) na detecção de árvores e na estimação de variáveis biométricas em um inventário florestal em uma via urbana do município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho de diferentes métodos de detecção das árvores com nuvem de pontos e modelo de altura do dossel (CHM - *Canopy Height Models*);
- Avaliar a acurácia de diferentes formas de estimar o diâmetro de copa;
- Verificar a acurácia das estimativas dos valores de altura total, diâmetro a 1,3m do solo e diâmetro da copa dos indivíduos arbóreos da via urbana a partir de métricas tradicionais baseadas nas nuvens de pontos FAD-RPA.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Arborização Urbana

O crescimento acelerado e desordenado das cidades tem gerado mudanças drásticas nas paisagens, afetando os serviços ecossistêmicos (JOHNSON; THOMPSON; SAINI, 2015). Isso contribui com problemas de saúde pública por desconforto térmico e surgimento de doenças relacionadas à água, como dengue e leptospirose, devido as enchentes cada vez mais frequentes (OLIVEIRA-JÚNIOR *et al.*, 2019, SON; CHEN; CHEN, 2020, CORREIA FILHO *et al.*, 2021). No Brasil, em 1890, cerca de 10% da população vivia nas cidades, mudança extrema para o que se vê no ano de 2022, em que 61% da população vive em áreas urbanas (IBGE, 2022).

A arborização urbana é utilizada para mitigar os impactos antrópicos nas cidades causados pelas grandes urbanizações (GONG; CHEN; YU, 2013). Pode ser definida como o conjunto de vegetação arbórea dentro do perímetro urbano (MAGALHÃES, 2006; BOBROWSKI, 2011; GOMES, QUEIROZ, 2011; UCELLA-FILHO *et al.*, 2022). A arborização deve ser vista como parte da infraestrutura da localidade, sendo integrada ao entorno (ALBERTIN *et al.*, 2020).

A arborização como é conhecida hoje, começou em Paris, por meio do plano de reurbanização, no século XIX, por Haussman (SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017). No final do século XIX, houve um entendimento de que a arborização nos centros das cidades brasileiras era importante para higienização, salubridade e estética (ANDRADE, 2004). Em 1896, em São Paulo, oficializou-se regras para implementação, com finalidade estética.

Entre os tipos de arborização urbana, tem-se: (i) as áreas verdes, formadas por parques, bosques, jardins e praças; e (ii), a arborização de ruas ou arborização viária, que abrange árvores que estão nas calçadas e em canteiros

centrais das vias. São as árvores da arborização viária que possuem maior contato com a população em geral e as que mais causam problemas quando inseridas em ambientes inadequados (BIONDI, 2008).

Diversas são as vantagens da arborização urbana, como a valorização econômica de áreas com árvores quando comparadas as áreas sem árvores (VIGNOLA JUNIOR, 2015). Além disso, tem-se os benefícios sociais e ecológicos, contribuindo para a qualidade do ar, equilíbrio hídrico, conforto térmico e reduzindo a poluição sonora e a velocidade do vento (CARDOSO *et al.*, 2017, PAIVA *et al.*, 2022), criando corredores ecológicos, conectando os fragmentos florestais, importantes para abrigo, refúgio e alimento da fauna e a perpetuação de espécies florestais.

Porém, sabe-se que implementar a arborização nas cidades brasileiras é difícil devido à falta de espaço adequado, visto que há excesso de fiação e calçadas estreitas e descontinuadas, em função da carência de regulamentação (VIGNOLA JUNIOR, 2015). A falta de planejamento prévio da arborização pode trazer prejuízos como o uso excessivo de espécies exóticas, ocasionando danos ecológicos à biodiversidade nativa (SARTORI *et al.*, 2021), danos a estruturas como calçadas e muros, quedas de galhos e frutos em veículos (VIGNOLA JUNIOR, 2015) e problemas com fiação elétrica, postes de iluminação, calhas e encanamentos. Além disso, a impermeabilização do solo prejudica a infiltração de água das chuvas, aumentando o escoamento superficial e o risco de enchentes no ambiente urbano e a assoreamento dos rios que cortam as cidades (PAUL; MEYER, 2008). A falta de áreas arborizadas também pode acarretar o aumento das temperaturas e a redução da umidade relativa do ar (LEAL; BIONDI; BATISTA, 2014).

A falta de políticas de valorização, ações públicas e privadas, estudos científicos e pessoas especializadas, voltados para a implementação, manutenção e orientação, em grande parte das cidades brasileiras, para alcançar o objetivo de melhorar a qualidade de vida da população por meio da arborização urbana, mostra a necessidade de se avançar nesta área (DUARTE *et al.*, 2018). É importante que os responsáveis pela arborização respeitem as leis vigentes, que a população participe e se comprometa com a conservação, evitando problemas, prejuízos e acidentes (BACELAR *et al.*, 2020).

Nesse sentido, um instrumento legal que pode ser utilizado no planejamento municipal é o plano diretor de arborização urbana (PDAU), o qual tem o objetivo de orientar a população e os órgãos públicos como implantar, preservar e manejar espécies arbóreas urbanas, fundamentados em técnicas e demanda comunitária (ZAMBONATO *et al.*, 2021). Um PDAU contém informações quali-quantitativas das espécies implantadas nos ambientes urbanos, além de formas de manejo, gestão e planejamento da arborização urbana. Para elaboração do plano é necessário conhecimento prévio do ambiente urbano, que pode ser adquirido por meio do inventário florestal (SILVA, 2018).

2.2 Inventário Florestal Urbano

O inventário florestal é uma atividade voltada a obter informações quantitativas e qualitativas das árvores de um local (SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017), em que as variáveis levantadas são definidas de acordo com o objetivo. O inventário florestal em áreas urbanas permite também identificar se os locais são ou não arborizados.

Existem diferentes tipos de inventários, sendo algumas classificações baseada na maneira de obtenção dos dados e segundo a abordagem da população no tempo (SANQUETTA *et al.*, 2006). Quanto à maneira de obtenção dos dados, os inventários podem ser censo ou enumeração completa, onde mede-se todos os indivíduos da população, obtendo-se valores reais; e a amostragem, medindo-se parte da população, obtendo estimativas dos parâmetros. Quanto à abordagem da população no tempo, eles podem ser temporários, com objetivos de avaliar momentaneamente a floresta, instalando parcelas temporárias; e contínuos, com o intuito de avaliar as modificações que ocorrem na população, sendo instaladas parcelas permanentes.

Quando o objeto de estudo são árvores em ambientes urbanos, tem-se o inventário florestal urbano. Este tipo de inventário florestal permite também identificar se os locais são ou não arborizados. O tipo de inventário da arborização será definido de acordo com o tamanho da cidade, recurso disponível e objetivo (LIMA NETO, 2011). Já Bobrowski (2011), citou, que o inventário da arborização de ruas pode ser realizado em três aspectos diferentes: inventário parcial (considera apenas um componente - área, espécie ou condição das árvores, podendo ser realizado por censo ou amostragem), inventário por enumeração completa (são inventariadas todas as árvores da área) ou inventário por amostragem (adota-se uma amostra da população para inventariar).

Os inventários contínuos na área urbana são de extrema importância, pois o ambiente sofre variações regulares devido ao fluxo de pedestres e veículos, inserção de novas construções e aparatos urbanos, como postes, lixeiras e fiação elétrica, fazendo com que o local seja dinâmico (BIONDI; ALTHAUS, 2005, SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017). O monitoramento das árvores é importante por permitir que o manejo adequado seja realizado no indivíduo e na época correta, evitando, assim, medidas tomadas de forma errônea e no momento menos propício (BIONDI; ALTHAUS, 2005, SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017). Além disso, em posse dos dados obtidos pelo inventário, o poder público pode elaborar planos e projetos que serão de grande importância no planejamento da arborização, no âmbito da implantação, manutenção e manejo (PAIVA *et al.*, 2010).

O inventário florestal urbano permite obter dados da composição florística local, fitossanitários e de variáveis dendrométricas. Com essas variáveis em inventários contínuos, é possível determinar o crescimento dos indivíduos, a presença de obstáculos ao desenvolvimento e o estado fitossanitário ao longo do tempo, evitando futuros problemas. As principais variáveis estudadas incluem a localização do indivíduo, identificação do nome científico e comum das espécies, altura total e da primeira bifurcação, diâmetros do tronco e copa, condições das raízes e fitossanidade (SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017). Devido ao crescente interesse nos serviços obtidos pelas árvores das ruas, aumentou-se a procura por métodos de inventários para estimar variáveis como área de copa, volume e biomassa da população arbórea. Estes são dados

importantes para potencializar os serviços fornecidos pela arborização (ROLLO, 2014).

Devido às grandes quantidades de informações que são geradas no inventário florestal, o processamento manual destes dados se torna lento. Visando isso, alguns programas de computador são utilizados para acelerar esta etapa, como os programas específicos para a arborização urbana, *Arbor et Salus*® e *City Trees! Lite*®, que processam e geram relatórios. Outros meios para o processamento dos dados são a utilização das planilhas eletrônicas. A informatização faz com que além do processamento, o acesso, atualização e armazenamento dos dados sejam mais fáceis e mais rápidos (SILVA; PAIVA; GONÇALVES, 2017).

Além disso, para facilitar o monitoramento das árvores nas ruas e os estudos da dinâmica da arborização urbana, órgãos competentes devem incorporar ferramentas de SIG (Sistema de Informações Geográficas) na gestão da arborização urbana (LIMA NETO *et al.*, 2012), podendo ser utilizadas técnicas de sensoriamento remoto e fotogrametria (BOBROWSKI, 2011).

2.3 Inventário Florestal Aprimorado

O Inventário Florestal Aprimorado (EFI - proveniente do inglês *Enhanced Forest Inventory*) é capaz de fornecer dados além dos disponibilizados pelo sistema de inventário tradicional, com alto nível de precisão e com custos reduzidos (WHITE *et al.*, 2017). Os EFIs podem ser de abordagem por área ou por árvore individual. A abordagem por área utiliza métricas obtidas pelo EFI, associada com o inventário tradicional em parcelas para posteriormente, por meio de modelagem, estimar para toda a área de interesse (WHITE *et al.*, 2017). Já a abordagem por árvore individual consiste em ajustar modelos para obter estimativas dos parâmetros para cada árvore avaliada pelo Sensoriamento Remoto (SR) (WANG; KOCH, 2008).

A utilização de técnicas como o SR permite que o EFI seja possível. Por meio dele, é possível utilizar ferramentas como o LiDAR (terrestre, aéreo ou orbital), que tem seu uso cada vez mais comum. Esta tecnologia baseia-se na emissão de radiação eletromagnética que ao alcançar o objeto de interesse é espelhada para um receptor no próprio equipamento, sendo possível calcular a intensidade, distância, ângulo de retorno por meio do tempo entre a transmissão e recepção do sinal, formando nuvens de ponto com coordenadas X, Y e Z de cada retorno (VASCONCELLOS, 2020).

2.3.1 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto é definido como técnica que utiliza sensores para coletar dados por meio de medidas obtidas à distância, sem o contato com o objeto de interesse, utilizando equipamentos para o processamento dos dados (JENSEN, 2011). Com o SR obtém-se informações de objetos na superfície terrestre por meio da radiação emitida e refletida, facilitando a coleta de dados em áreas de difícil acesso (READ; TORRADO, 2009).

Segundo Novo (2010), o SR pode ser dividido em dois subsistemas, sendo eles o de aquisição de dados e o de produção de informações. O subsistema de aquisição de dados é formado por uma fonte de radiação, a plataforma (satélite ou aeronave), o sensor e o centro de dados (estação de recepção, processamento de dados de satélite e a aeronave). Já o subsistema de produção de informações é composto pelo sistema de aquisição de dados em solo (para validação dos dados de SR), sistema de processamento de imagens e o sistema de geoprocessamento.

Os sensores utilizados por essa técnica são classificados segundo a fonte de radiação eletromagnética (REM) em ativos ou passivos. Os ativos geram sua própria luz, que são refletidos pelos alvos (casos como os que utilizam lasers e radares, por exemplo, o LiDAR). Já os sensores passivos necessitam de uma

fonte externa (podendo esta ser natural como o sol, ou artificial, como nos usos dos flashes de uma câmera ou o sinal emitido por radar), para operar (exemplo da FAD - fotogrametria aérea digital). Além disso, o SR pode ser bidimensional (2D) ou tridimensional (3D), podendo as imagens ser obtidas a nível suborbital por meio de fotografias e vídeos ou a nível orbital, por meio de imagens de satélite e ainda, imageadores ou não imageadores – quando fornecem ou não uma imagem 2D, respectivamente (NOVO, 2010; JENSEN, 2011; FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

Os satélites de coleta de dados são geralmente não-estacionários, ou seja, não ficam parados, demorando um certo tempo para passar pelo mesmo local. Estes podem estar equipados com diferentes sensores espectrais, sendo conhecidos então como satélites multiespectrais (MORAES, 1999). Com o passar dos anos houve um avanço na tecnologia multiespectral, onde os sistemas imageadores passaram a adquirir imagens em centenas de bandas estreitas, conhecidos então como sensores hiperespectrais (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). As imagens obtidas pelos satélites são de grandes áreas mas perdem nos quesitos resolução espacial e temporal para os demais métodos de obtenção de dados (KOMAREK *et al.*, 2022). Algumas ferramentas de SR avançaram consideravelmente devido ao desenvolvimento de sensores mais potentes, como é o caso do LiDAR e da fotogrametria (RIBEIRO *et al.*, 2019).

Em alguns de seus usos, o SR contribui para o inventário florestal, permitindo a avaliação de grandes áreas de forma rápida e eficiente, contribuindo para a tomada de decisão, subsidiando ações do manejo florestal, conservação e políticas públicas relacionadas ao meio ambiente, sendo possível também monitorar de forma contínua os recursos florestais (SOUZA *et al.*, 2017; ROCHA *et al.*, 2020).

2.3.2 Fotogrametria

A fotogrametria pode ser definida como ato de medir graficamente por meio da luz, onde no grego, *photos* significa luz, *gramma* é escrita e *metron*, medida (TOMMASELLI, 2009). Ela pode ser definida também como uma ferramenta que possibilita a obtenção de informações sobre objetos físicos por meio do registro, medição e interpretação de imagens fotográficas, assim como o padrão de interação entre a energia eletromagnética e a superfície terrestre (TRINDADE, 2021).

A fotogrametria pode ser classificada de acordo com o método de obtenção das imagens: aérea, obtidas em veículos aéreos; terrestre, obtidas em pontos fixos no solo; fotogrametria espacial, onde as fotos são obtidas fora da Terra, por meio de sondas espaciais ou satélites; e fotogrametria a curta distância, onde o objeto de interesse está próximo à câmera (TOMMASELLI *et al.*, 1999).

Além dessas classificações, a fotogrametria pode ainda ser classificada de acordo com o equipamento utilizado e o processamento das imagens (TOMMASELLI, 2009). Na fotogrametria analógica são utilizados equipamentos analógicos e há ausência de uso de computadores, não sendo mais usual. Na fotogrametria analítica, utiliza-se o computador, possibilitando a obtenção de modelos estatísticos mais avançados. Já a fotogrametria digital, que com o avanço na tecnologia das câmeras, tornando-as digitais e o uso de computadores poderosos, utiliza-os para todas as etapas do processo.

O uso conjunto de aviões e fotografias fez com que a fotogrametria fosse fundamentalmente importante em levantamentos topográficos (ZHU, 2006), em que inicialmente as imagens eram obtidas por câmeras a bordo de aeronaves e analisadas com o estereoscópio (CARVALHO, 2021). Com o avanço da tecnologia e a popularização da fotogrametria, seu uso vem sendo realizado em aeronaves remotamente pilotadas (RPA, do inglês *Remote Piloted Aircraft*) (NÄSI *et al.*, 2015), tornando a aquisição dos dados mais dinâmica (WHITEHEAD; HUGENHOLTZ, 2014).

O uso de algoritmos de visão computacional automatizada, tal como *Structure from Motion* (SfM), permite gerar imagens 3D por meio de um conjunto de imagens 2D, que quando sobrepostas extraem automaticamente pontos de correspondência (GOODBODY *et al.*, 2019). Assim, permite a montagem de uma ortofoto, por onde é possível ter a percepção espacialmente contínua da área (LEBERL *et al.*, 2010). Esse algoritmo permitiu melhorias na observação 3D e multiespectral das copas das árvores (DANDOIS *et al.*, 2010; CARVALHO, 2021).

A sobreposição ocorre nos sentidos lateral e longitudinal, sendo a lateral entre as linhas de voo, funcionando como margem de segurança para evitar espaços vazios entre as linhas e a longitudinal é a que ocorre entre as fotos sucessivas na linha de voo, permitindo a visualização 3D e a reconstituição estereoscópica (GRANSHAW, 2016). Recomenda-se que a taxa de sobreposição seja de pelo menos 60% na longitudinal e 30% na lateral (WOLF *et al.*, 2014).

Silva Filho (2003) mostrou que uma das grandes vantagens da utilização do sensoriamento remoto para o inventário e manejo de áreas verdes é conseguir relacionar dados numéricos com os dados espaciais, obtendo resultados para problemas nas áreas urbanas e rurais. Já Kurihara e Encinas (2003) afirmam que essa ferramenta pode ser utilizada para o planejamento, inventário e monitoramento da arborização urbana.

Entre as principais vantagens dessa ferramenta estão a rápida aquisição de informações, onde o objeto de interesse não precisa ser tocado, pode-se medir a qualquer momento e quantas vezes quiser, possibilitando também medições em áreas de difícil acesso. Além disso, a precisão pode ser aumentada de acordo com o objetivo do trabalho (TOMMASELLI, 2009). Na área florestal, estimativas de variáveis como altura, diâmetro da copa e volume, tanto para nível individual como populacional, podem ser obtidas (ALMEIDA *et al.*, 2020).

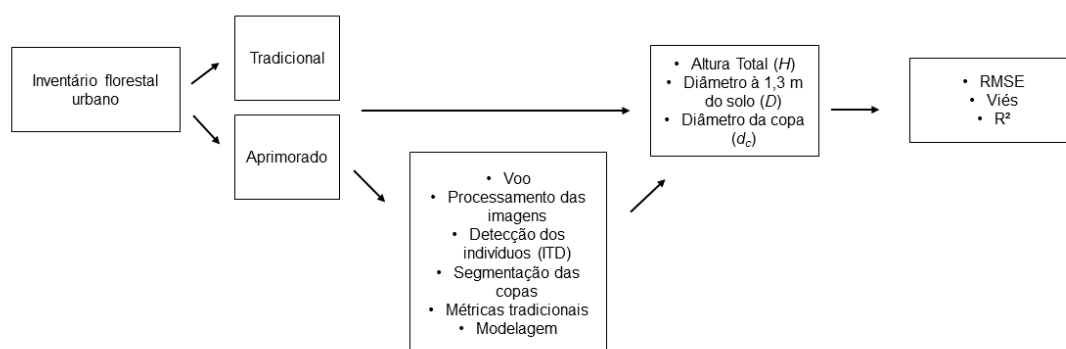
Entre os desafios para aplicação da FAD na área florestal encontra-se a dificuldade de se obter o modelo digital do terreno (MDT), já que as imagens são obtidas acima das copas (VARGAS, 2007). Apesar da dificuldade, alguns trabalhos obtiveram bons resultados na utilização da fotogrametria para

estimativas dos atributos florestais. Em áreas com vegetação aberta e fragmentada, onde o solo é reconhecido com facilidade, os resultados obtidos com FAD são semelhantes aos provenientes do LiDAR. Já em áreas com vegetação densa, em grandes extensões há uma dificuldade em obter com acurácia a topografia da área, o que pode resultar em uma normalização da nuvem de pontos pouco precisa (ALMEIDA *et al.*, 2020), onde há uma subestimação da altura das árvores. Além disso, a FAD depende do SfM utilizado, a densidade dos pontos e a classificação da nuvem de pontos. Após a geração do MDT, é possível estimar as características da vegetação, por meio dos dados obtidos em campo e pelo SR, utilizando a abordagem de detecção de árvores individuais (ITD) (ALMEIDA *et al.*, 2021), onde cada árvore é considerada uma unidade e as estimativas provenientes de suas características são determinadas pelas métricas extraídas da nuvem de pontos (MOHD JAAFAR *et al.*, 2018).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi esquematizada na Figura 1 e explicada nos tópicos abaixo.

Figura 1. Fluxograma metodológico do estudo.

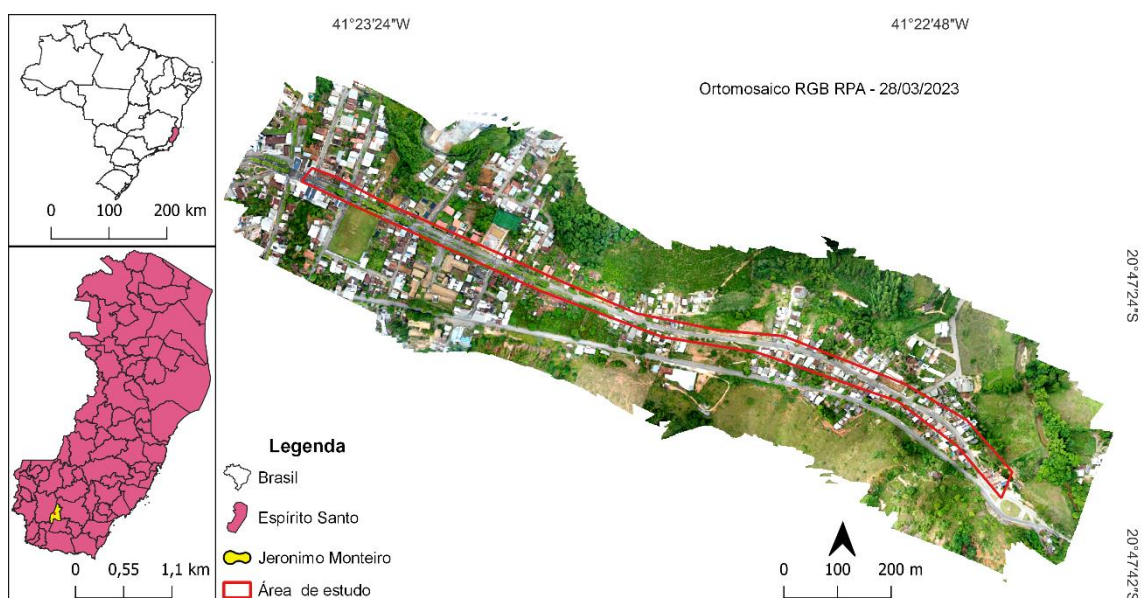


Fonte: o autor

3.1 Área de Estudo

O trabalho foi realizado na Avenida Governador Lindemberg, localizada no município de Jerônimo Monteiro, sul do Espírito Santo, Brasil (Figura 2). A área apresenta as coordenadas geográficas aproximadas de 20° 04' 35" de latitude Sul e, 41° 07' 29" longitude Oeste de Greenwich (INCAPER, 2023) e altitude de aproximadamente 108 m. Nesta localidade se encontram pontos importantes da cidade, como o Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, Ministério Público e diversos estabelecimentos comerciais. A avenida possui, aproximadamente, 1,5 km de extensão e tem como limites a rodovia ES-482 e a Avenida Dr. José Farah. A vegetação predominante é de indivíduos das espécies oiti (*Moquilea tomentosa* Benth.) e sibipiruna (*Cenostigma pluviosum* (DC.) Gagnon & G. P. Lewis), que são espécies nativas do Brasil.

Figura 2. Localização da área de estudo perante ao país, estado e perímetro urbano.



Fonte: o autor

3.2 Inventário Florestal Urbano

Nos dias 14 e 15 de março de 2023 foi realizado o censo da arborização viária, sendo obtidas as seguintes variáveis: diâmetro da copa (d_c), altura total (H) e circunferência do tronco à 1,3 m do solo (C). A fita métrica foi utilizada para obter os valores do raio da copa, coletando-os em oito sentidos diferentes, medindo-se do ponto central do fuste até a última linha de projeção da copa para cada lado, nos sentidos dos pontos cardeais e colaterais (norte, sul, leste, oeste, nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste), tendo assim, oito raios. O d_c foi obtido pelo dobro do valor da média aritmética de quatro ou oitos raios medidos. A altura total, que foi considerada como sendo a distância do ramo apical mais alto da árvore até sua base, foi obtida com o auxílio da régua telescópica de 15 m. Já os valores de diâmetro à 1,3 m do solo (D) foram obtidos transformando a C obtida com a fita métrica, por meio da fórmula: $D = C/\pi$ (1). Para estimar o erro de medição de H e C , 20% das árvores foram selecionadas aleatoriamente e remedidas. Para conhecimento, foram calculados o coeficiente de variação, sendo a fórmula apresentada abaixo.

$$CV = \frac{S}{\bar{Y}} 100 \quad (2)$$

Em que, CV: coeficiente de variação, s: desvio padrão, \bar{Y} : média dos valores observados.

3.3 Inventário Florestal Urbano Aprimorado

3.3.1 Aquisição de imagens e dos pontos de controle terrestre

A área de estudo foi sobrevoada com uma aeronave remotamente pilotada (RPA) do tipo multirrotor, modelo DJI MAVIC 2 PRO (<https://www.dji.com/br>) (Figura 3). A RPA possui uma câmera RGB com 20 megapixels, sensor CMOS e resolução de 5472 x 3648, que fica instalada em um *gimbal* para reduzir as vibrações mecânicas no momento da captura das fotos. O voo foi realizado no dia 28/03/2023, com o modo visual (VLOS – *visual line of sight*), de acordo com as normas brasileiras, à uma altura de 120 m, de acordo com ICA 100-40 (DECEA, 2015), sobreposição longitudinal de 80% assim como a lateral, com as opções de perímetro e padrão cruzado ativados, totalizando 463 fotos. O plano de voo foi desenvolvido pelo aplicativo *DroneDeploy* (<https://www.dronedeploy.com>). Foram necessários dois voos, com áreas de interseção para abrangê-la em totalidade, tendo cada voo a duração de 15 min, utilizando uma bateria, sem a utilização de toda sua carga. O dia estava nublado, com 90% de cobertura de nuvens. As imagens foram salvas em um cartão de memória no formato “.jpg”.

Figura 3. MAVIC 2 PRO, aeronave remotamente pilotada (RPA) utilizada no inventário aprimorado.



Fonte: o autor

Para a coleta dos pontos de controle do terreno (PCs), utilizou-se dois receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) *Zenith 16*, de dupla frequência (L1/L2), da GeoMax (<https://geomax-positioning.com>). Um dos receptores foi utilizado como base (Figura 4), sendo instalado no Parque de Exposição municipal, local próximo à área de estudo enquanto o outro foi utilizado como *rover*. Durante aproximadamente três horas, o ponto no qual a base foi inserida foi rastreado com o objetivo de obter uma precisão planialtimétrica na ordem de milímetros, pois, a técnica RTK (*Real Time Kinematic*) requer que o receptor GNSS de referência rastreie os sinais dos satélites por um período suficiente para estimar os erros sistemáticos e aleatórios, para então transmitir essas informações para o receptor móvel. Após a coleta dos dados, foi realizada a correção da coordenada por meio do IBGE PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). Os alvos no campo eram estruturas presentes na cidade, que eram visíveis nas imagens aéreas, como faixas de pedestres e bueiros (Figura 5). Foram coletados vinte e sete pontos de controle distribuídos ao longo de toda área de estudo, sendo vinte utilizados para o georreferenciamento e sete para a validação.

Figura 4. *Global Navigation Satellite System* (GNSS) utilizado como base, alocado para estabilização.



Fonte: o autor

Figura 5. Faixa de pedestre e bueiro utilizados para obtenção dos pontos de controle.



Fonte: o autor

3.3.2 Processamento das imagens

As imagens foram processadas no *software Agisoft MetaShape* (<https://www.agisoft.com>), para alinhamento das imagens e criação da nuvem de pontos 3D, modelo digital de terreno (MDT), de superfície (MDS) e o ortomosaico. O programa oferece algoritmos de estrutura em movimento (*Structure from Motion - SfM*) que são usados para alinhar a câmera, encontrando pontos homólogos nas imagens sobrepostas e reconstruir na forma 3D (GOODBODY *et al.*, 2019).

Para o alinhamento das 463 fotografias, o parâmetro de precisão definido foi o *Highest* (elevado), com pré-seleção dos pares como *generic*, nos limites de 40.000 *key-points* e 7.000 *tie points*. Durante o processo de alinhamento, as imagens foram georreferenciadas, via PCs coletados com RTK, sendo 27 pontos, 20 para referenciamento e 7 para validação, seguindo a projeção UTM, zona 24S com Datum SIRGAS2000. Os erros podem ser observados na Tabela 1. Na geração da nuvem densa de pontos, os parâmetros foram definidos como *Ultra high* (muito elevado) para a qualidade e *Mild* (leve) para o modo de filtragem de profundidade. A nuvem de pontos foi exportada no formato LAS.

Tabela 1. Raiz do quadrado médio do erro dos pontos de controle.

Ponto de controle	Quantidade de pontos	Erro X (leste) (cm)	Erro Y (norte) (cm)	Erro Z (altitude) (cm)	Erro em XY (cm)	Erro total (cm)
Referenciamento	20	24,0422	8,5621	22,611	25,5213	34,0969
Validação	07	11,4544	34,6559	19,276	36,4998	41,2771

Fonte: o autor

Para gerar o MDT foi realizada a classificação da nuvem de pontos em solo ou não solo, de forma automática, com a configuração de 15° para ângulo máximo, pois a área não é declivosa, distância máxima de 0,10 m, ou seja, todos

os pontos com até este valor são classificados como solo e o tamanho de objeto máximo de 17 m, pois não havia árvores maiores que este valor na área. Ao término da classificação, o modelo foi criado com os dados classificados como solo. Após esta etapa, os dados classificados como solo foram filtrados e interpolados pelo método *Triangulated Irregular Network* (TIN). Este método consiste em obter valores para pontos que não foi possível captar, por meio da média entre os pontos mais próximos. A fim de compensar os efeitos do terreno, a nuvem de pontos passou por um processo de normalização, que forneceu uma linha de base de elevação, deixando-a plana. Dessa forma, todas as elevações são relativas à superfície do solo. A normalização foi feita subtraindo as elevações do terreno no MDT das elevações de cada ponto dentro da nuvem de pontos, pela calculadora *raster* do programa *R*. O modelo digital de superfície (MDS) e o modelo de altura do dossel (*Canopy Height Models* – CHM) são camadas *raster* que representam a maior elevação obtida. Como a nuvem de pontos foi normalizada, a superfície derivada representa a altura do dossel, sendo assim, é referida como CHM.

3.3.3 Validação da fotogrametria aérea digital (FAD)

A qualidade dos produtos derivados da FAD foi avaliada de duas maneiras: (i), pelos valores de altitude do terreno do MDT e (ii) pelas alturas das árvores estimadas pela nuvem de pontos. Os valores de altitude do terreno obtidos com o RTK (valor observado) foram utilizados para avaliar a acurácia do MDT (valores estimados). A acurácia dos valores estimados de altura das árvores com a nuvem de pontos 3D da FAD foi avaliada a partir dos valores de H obtidos em campo. Para a validação, foram utilizadas as estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RMSE), viés (V) nas formas absoluta e relativa e o coeficiente de determinação (R^2), apresentadas abaixo. Além das estatísticas descritas acima, foram construídos gráficos de dispersão entre os valores observados e estimados.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad \text{RMSE (\%)} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{Y}} 100 \quad (3)$$

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})}{n} \quad V (\%) = \frac{V}{\bar{Y}} 100 \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

Em que, Y : valor observado; \hat{Y} : valor estimado; n : número de indivíduos amostrados; \bar{Y} : média dos valores observados.

3.3.4 Detecção e segmentação das árvores

Para detecção individual de árvores (ITD – *Individual Tree Detection*) foram testados diferentes algoritmos de detecção, a fim de avaliar e detectar qual apresenta o maior número de identificações corretas, sendo a precisão calculada por meio das árvores detectadas corretamente (Dc) e erros de omissão relativa (Eo):

$$Dc = \frac{N_d}{N_o}; \quad (6)$$

$$Eo = \frac{N_{nd}}{N_o} \quad (7)$$

em que, N_d : número de árvores detectadas corretamente, N_{nd} : número de árvores não detectadas e N_o : número de árvores observadas no campo.

Os topos das árvores foram detectados na nuvem de pontos normalizada utilizando a função *locate_trees*, implementado no pacote *lidR* (ROUSSEL; GOODBODY; TOMPALSKI, 2022), no *software* R (R CORE TEAM, 2023). Foi utilizado o algoritmo de detecção *Local Maximum Filter* (POPESCU; WYNNE, 2004). Neste algoritmo, o número de árvores detectadas é correlacionado com o argumento *Windows Sizes* (WS) utilizado, de modo que valores de WS menores detectam, geralmente, maior quantidade de árvores, enquanto valores

de WS maiores podem não detectar árvores menores que porventura estão escondidas por árvores grandes. Neste estudo, foram testados algoritmos que utilizam a nuvem de pontos e algoritmos que utilizam o CHM para a detecção. Os algoritmos utilizados para nuvem de pontos foram três, o de janela fixa, cujo valor atribuído foi de 5x5 pixels, janela variável e o de janela variável exponencial. Para o CHM, foram utilizados também três algoritmos, todos eles tendo variação de pixel em 0,5; 1; 1,5 e 2, sendo os algoritmos *p2r* (*point-to-raster*), *p2r smoothed* e *pitfree*, com e sem o ajuste de círculo (KHOSRAVIPOUR *et al.*, 2014).

Por meio da ferramenta *buffer* do *software* de código aberto QGIS, que considerou a camada com as coordenadas posicionais (X, Y, RTK), foi gerado um polígono circular de 0,25 m², que delimitou a área da copa das árvores. Assim, uma copa foi considerada corretamente detectada quando o algoritmo *Imf* a colocou dentro do polígono que representa a árvore em questão. Contudo, se mais de uma árvore foi colocada dentro do polígono de copa, o ponto mais próximo da localização no campo foi considerado para o cálculo de *Dc*. Para validar a etapa da detecção das árvores, um mapa das copas das árvores foi gerado por meio de um ortomosaico RGB da área de estudo.

Após a escolha do melhor algoritmo para detecção das árvores individuais, foi realizada a segmentação, que consiste em delimitar individualmente as árvores detectadas, utilizando o pacote *lidR*, por meio das funções *segment_trees* e *dalponte2016* (DALPONTE; COOMES, 2016), que utiliza como argumentos os dados CHM e *ttops*, já obtidos em outras etapas. Após esse processo, a área de copa das árvores identificadas e segmentadas foram obtidas pelo método apresentado no tópico 3.3.6.

3.3.5 Diâmetro da copa das árvores

As áreas da copa no inventário aprimorado foram obtidas por meio de duas metodologias: (i) segmentação das copas, como apresentado no item anterior, sendo a área das copas obtidas de forma automática, e (ii) por meio da delimitação da copa manualmente no *software* QGIS (https://qgis.org/pt_BR/site), utilizando a imagem processada (item 3.3.2). Para a transformação da área da copa em diâmetro da copa (d_c), utilizou-se a expressão 8.

$$d_c = \sqrt{\frac{4a_c}{\pi}} \quad (8)$$

Em que: a_c : área da copa (m^2); d_c : diâmetro da copa (m).

As avaliações foram feitas por comparação entre os dados de diâmetro de copa obtidos por meio da FAD de forma manual, (i) dados de campo, obtidos com quatro raios, (ii) dados de campo, com oito raios e (iii) dados utilizando a FAD, cuja área foi obtida de forma automática, por meio do RMSE, viés e a correlação de Person (r).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

Em que, r : coeficiente de correlação de Person, X_i : valor observado do método analisado, \bar{X} : média dos valores observados do método analisado, Y_i : valor observado do dado de referência, \bar{Y} : média dos valores observados do dado de referência.

3.3.6 Métricas tradicionais FAD-RPA

A métricas utilizadas nos modelos para estimar a altura das árvores (H_{FAD}), do diâmetro do tronco (D_{FAD}) e da copa (d_{cFAD}) foram extraídas da nuvem de pontos normalizada, no *software* R, por meio do pacote *lidR*, utilizando a função *tree_metrics* (PEBESMA; BIVAND, 2023). Esta função obtém métricas derivadas à nível de área e à nível de indivíduos. Neste trabalho foram utilizadas métricas (Tabela 2) com base na copa segmentada de cada árvore identificada automaticamente, para o melhor método de detecção encontrado no item 3.3.4.

Tabela 2. Métricas tradicionais extraídas da nuvem de pontos da fotogrametria aérea digital (FAD).

Sigla	Variável
hmin	Altura mínima
hmax	Altura máxima
hmean	Altura média
hmode	Moda da altura
hcv	Coefficiente de variação da altura
hSD	Desvio padrão da altura
hV	Variância da altura
hIQ	Interquartil da altura
hskew	Assimetria da altura
hkurt	Curtose da altura
hpn*	Altura no percentil n*

*n é o valor do percentil (1, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 99).

Fonte: o autor

3.3.7 Modelagem das variáveis biométricas

Modelos de regressão múltipla foram ajustados para estimar os valores de H , D e d_c , tendo como variáveis explicativas, as métricas tradicionais baseadas na altura da nuvem de pontos 3D FAD-RPA (Tabela 2). Para selecionar o melhor conjunto de métricas utilizadas para cada modelo de regressão, foi empregado o método de busca exaustiva no *software* R. Este método testa e compara todas as variáveis independentes e encontra o melhor subconjunto para prever a variável dependente (Y) na regressão linear com a utilização do algoritmo *branch-and-bound*, por meio do pacote *Leaps* (LUMLEY, 2023). Essa seleção é feita por meio do critério de informação Bayesiano (*Bayesian Information Criterion* - BIC) onde cada modelo foi testado com até seis variáveis preditoras e obtido o valor de R^2 para cada combinação.

$$\text{BIC} = p \ln(n) - 2\ln(\hat{L}) \quad (10)$$

Em que, p : número de parâmetros; n : número de indivíduos amostrados; \ln : logaritmo neperiano; \hat{L} : verossimilhança do modelo nos dados.

A multicolinearidade foi analisada pelo fator de inflação de variância (VIF), desconsiderando modelos com valores de VIF das preditoras maiores que 10. A validação cruzada foi realizada de forma independente, com 1000 repetições de 20% das árvores amostradas.

Os modelos foram analisados, ainda, por meio dos gráficos de diagnóstico do modelo, a interpretação dos coeficientes e dos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e a homocedasticidade (Bartlett) dos resíduos. Posteriormente, foram analisadas as estatísticas RMSE e R^2 ajustado.

$$R^2_{\text{ajustado}} = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \quad (11)$$

Em que: R^2 : coeficiente de determinação, n : número de indivíduos total, p : número de variáveis estudadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Inventário Florestal Urbano

Na área de estudo foram encontrados 144 indivíduos. As espécies com maior quantitativo encontradas na referida avenida são *Moquilea tomentosa* Benth., *Cenostigma pluviosum* (DC.) Gagnon & G.P. Lewis var. *pluviosum* e *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos (Tabela 3). Essas espécies são comumente encontradas em ambientes urbanos por suas características, que proporcionam sombra nas áreas urbanas. Fernandes *et al.* (2018) e Toledo *et al.* (2021), ao analisarem as árvores da principal praça de São José do Rio Preto e da praça centenária José Bonifácio em Piracicaba, ambas em São Paulo, encontraram as mesmas espécies apresentadas neste trabalho. Em Rive, distrito de Alegre, Espírito Santo, Lobato *et al.* (2020) também encontraram essas espécies.

Tabela 3. Número de indivíduos por espécie encontrados na área de estudo.

Espécie	Nome comum	Quantidade
<i>Moquilea tomentosa</i> Benth.	Oiti	113
<i>Cenostigma pluviosum</i> (DC.) Gagnon & G.P. Lewis var. <i>pluviosum</i>	Sibipiruna	12
<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Ipê-amarelo	6
<i>Pachira aquática</i> Aubl.	Mungubá	3
<i>Handroanthus</i> spp.	Ipê	3
<i>Terminalia catappa</i> L.	Castanheira	2
<i>Ficus microcarpa</i> L.f.	Figueira	2
<i>Psidium guajava</i> L.	Goiabeira	1
<i>Pouteria caimito</i> (Rauiz & Pav.) Radlk.	Abil	1
Palmaceae	Palmeira	1

Fonte: o autor

Já na Tabela 4 são apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis diâmetro (D), altura total (H) e diâmetro de copa (d_c) das árvores inventariadas.

Tabela 4. Estatísticas descritivas das variáveis diâmetro à 1,3 m do solo (D), altura total (H) e diâmetro de copa (d_c) das árvores inventariadas.

Variável	Média	Mínimo	Máximo	CV (%)
H (m)	7,23	4,70	15,50	14,24
D (cm)	28,15	5,98	76,71	40,61
d_c (m)	7,74	3,84	14,16	24,50

Fonte: o autor

Devido à altura da fiação elétrica (cinco metros) e as podas drásticas que seguem padrões, os valores do CV de H e d_c são baixos, fazendo então com que as árvores tenham menor variação dessas duas variáveis, devido a limitação do crescimento dessas variáveis. Foi observado que as árvores maiores em H se encontravam nos canteiros centrais, onde não há presença das fiações elétricas.

Na Tabela 5 constam as estatísticas referentes ao erro de medição das variáveis diâmetro a 1,3 m do solo (D) e altura total (H). Os valores encontrados foram baixos (RMSE<3%; V<0,5%), indicando não haver tendência na medição de D e H das árvores da arborização urbana da avenida analisada. Almeida *et al.* (2020), em uma floresta tropical secundária de Mata Atlântica no nordeste brasileiro, encontraram erros de medição de D de 2,8% e H de 24% (RMSE).

Tabela 5. Estatísticas referentes ao erro de medição das variáveis diâmetro à 1,3 metros do solo (D) e altura total (H).

Variável	RMSE	RMSE (%)	V	V (%)
D (cm)	0,37	1,32	0,03	0,09
H (m)	0,22	2,98	0,02	0,33

Em que: RMSE: raiz do quadrado médio do erro; V: viés.

Fonte: o autor

4.2 Avaliação dos produtos FAD

As estatísticas da validação dos valores de elevação do MDT e da altura das árvores obtidas das nuvens de pontos estão apresentadas na Tabela 6. Na Figura 6 são apresentados os gráficos de dispersão entre altitudes obtidas com RTK e MDT (A) e altura total obtida em campo, pelo inventário florestal urbano, e na FAD (B). O MDT gerado é apresentado na Figura 7.

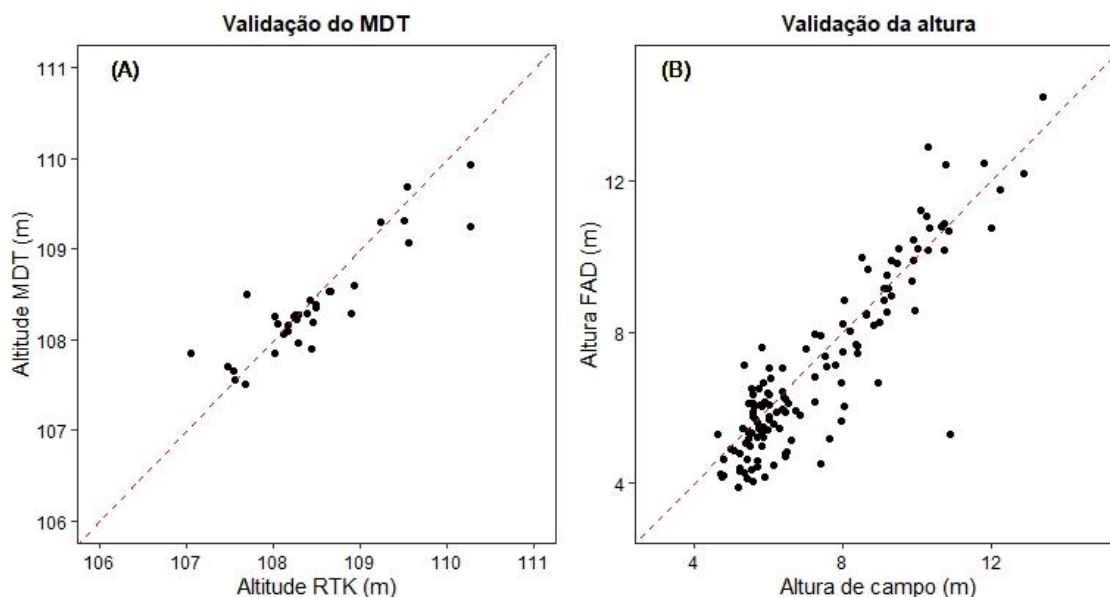
Tabela 6. Estatísticas para validação dos produtos da fotogrametria aérea digital (FAD).

	RMSE	RMSE (%)	V	V (%)
MDT	0,35	0,32	0,04	0,03
H_{FAD}	1,14	16,23	0,35	5,02

Em que: RMSE: raiz do quadrado médio do erro; V: viés; R²: coeficiente de determinação; MDT: modelo digital do terreno; H_{FAD}: altura obtida com a FAD.

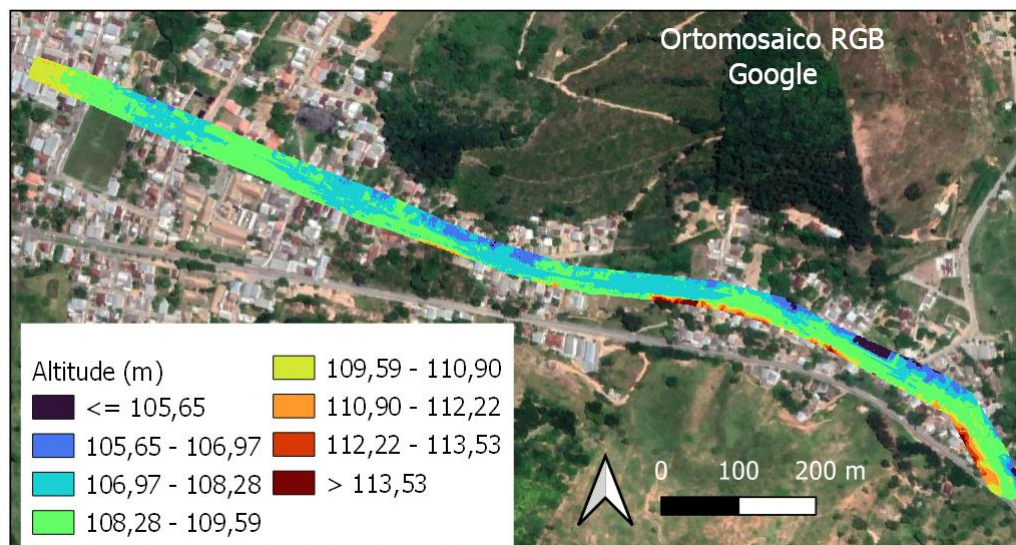
Fonte: o autor

Figura 6. Gráficos de dispersão entre (A): altitudes obtidas com RTK e modelo digital do terreno (MDT) e (B): altura total obtida em campo, pelo inventário florestal urbano e na fotogrametria aérea digital (FAD).



Fonte: o autor

Figura 7. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo.



Fonte: o autor

Pode-se observar o bom desempenho da FAD em estimar os valores de altitude do terreno da área de estudo, com erros reduzidos (0,35 m ou 0,32%) e um viés quase nulo (0,03%), ou seja, sem tendência aparente nas estimações (Tabela 6). Loose (2022), ao comparar a planimetria entre os dados obtidos em uma estação total, GNSS RTK e o RPA observou uma satisfatória semelhança entre os dados da estação total e do GNSS RTK, porém encontrou uma discrepância maior com os dados do RPA, em relação aos outros dois. Afirmou-se, então, que é necessário se atentar se o erro é aceitável, pois na tecnologia RPA, a precisão e acurácia são centimétricas.

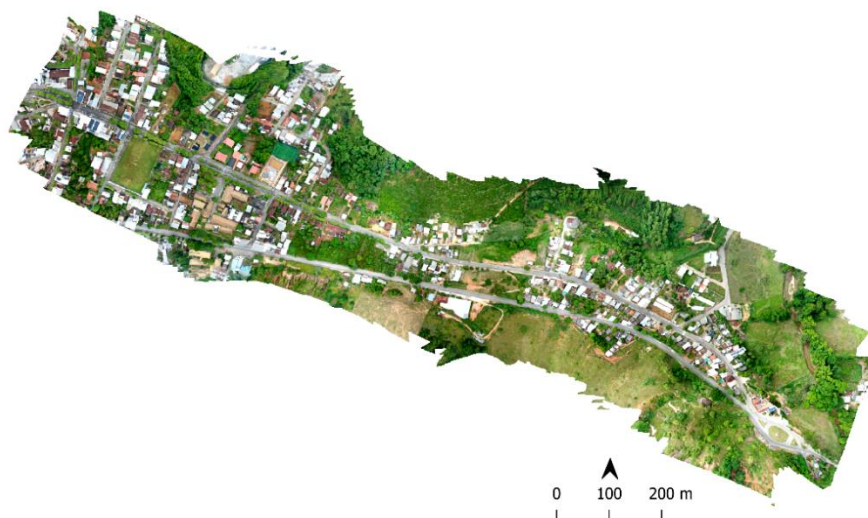
A altura da FAD apresentou um viés positivo (Tabela 6). Swinfield *et al.* (2019), ao estimarem a altura do dossel em uma floresta tropical da Indonésia, obtiveram um erro de 39% e um viés negativo, de -4,66 m. Tejada *et al.* (2014), em uma plantação de oliveiras, ao validar a altura total proveniente da nuvem de pontos normalizada, obtiveram valores de RMSE de 0,39 m ou 13,3% e R^2 de 0,81. Isibuea e Pingelb (2020), em uma floresta urbana em Chicago – EUA, avaliaram a obtenção de dados de altura total das árvores urbanas por meio da FAD-RPA. Estes autores concluíram que os dados obtidos com FAD-RPA eram comparáveis aos métodos manuais para medir a altura das árvores e que a

utilização dessa técnica pode ser empregada para monitorar as florestas urbanas.

Em áreas de vegetação densa, alguns pontos podem não serem reconstruídos, deixando falhas. Isso ocorre, pois há uma limitação para modelar o terreno sob a vegetação na fotogrametria (ALMEIDA *et al.*, 2021), o que não é o caso encontrado em áreas de arborização urbana de vias. A avenida analisada não apresenta um grande quantitativo de árvores, quanto poderia ter, pois, em sua extensão há áreas com ausência de indivíduos. A maioria das árvores estão distantes uma das outras, exceto nos canteiros centrais próximos ao final da área de estudo, onde estas se encontram mais adensadas. Este fato não foi um problema para a geração do MDT (Figura 7). Isso mostra que o algoritmo utilizado de classificação de pontos do terreno na nuvem de pontos conseguiu representar o relevo da área de estudo. Almeida *et al.* (2021), em uma plantação jovem de *Eucalyptus* sp. utilizou a mesma metodologia utilizada neste trabalho e obteve sucesso na geração do MDT, assim como Martins *et al.* (2022), que utilizaram a RPA na aquisição de variáveis em uma plantação de *Olea europaea* L.

Além do MDT, foram gerados também o ortomosaico (Figura 8) utilizado para visualização completa da área.

Figura 8. Ortomosaico gerado por meio das imagens obtidas com a aeronave remotamente pilotada (RPA).



Fonte: o autor

4.3 Detecção individual de árvores (ITD) e segmentação das copas

Os métodos para ITD foram avaliados por meio dos valores de árvores detectadas corretamente (D_c) e erro de omissão (E_o) (Tabela 7). Na Figura 9 são ilustradas as copas detectadas por quatro algoritmos.

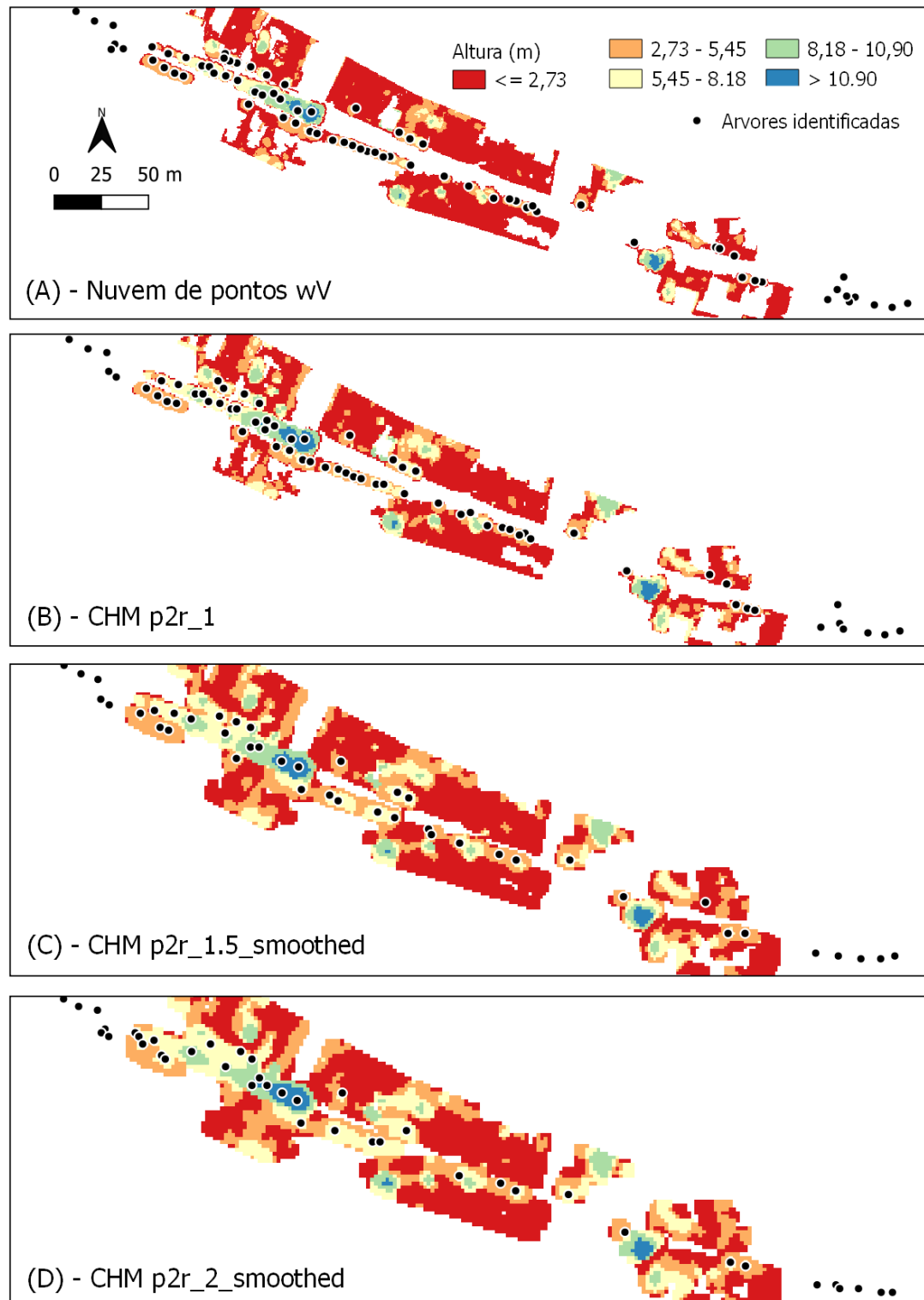
Tabela 7. Valores obtidos para os algoritmos de detecção das árvores.

Fonte	Algoritmo	D_c	E_o
Nuvem de pontos	w5	0,77	0,23
Nuvem de pontos	wV	0,78	0,22
Nuvem de pontos	wExp	0,76	0,24
CHM	p2r_0.5	0,74	0,26
CHM	p2r_0.5_s	0,74	0,26
CHM	p2r_1	0,76	0,24
CHM	p2r_1_s	0,67	0,33
CHM	p2r_1.5	0,74	0,26
CHM	p2r_1.5_s	0,56	0,44
CHM	p2r_2	0,73	0,27
CHM	p2r_2_s	0,51	0,49
CHM	pitfree_0.5_1	0,77	0,23
CHM	pitfree_0.5_2	0,73	0,27
CHM	pitfree_1_1	0,74	0,26
CHM	pitfree_1_2	0,73	0,27
CHM	pitfree_1.5_1	0,65	0,35
CHM	pitfree_1.5_2	0,63	0,38
CHM	pitfree_2_1	0,68	0,32
CHM	pitfree_2_2	0,60	0,40

CHM: modelo de altura do dossel; w5: janela fixa; wV: janela variável; wExp: janela variável exponencial; D_c : detectada corretamente; E_o : Erro de omissão.

Fonte: o autor

Figura 9. Algoritmos de detecção individual de árvores de uma parte da área de estudo.



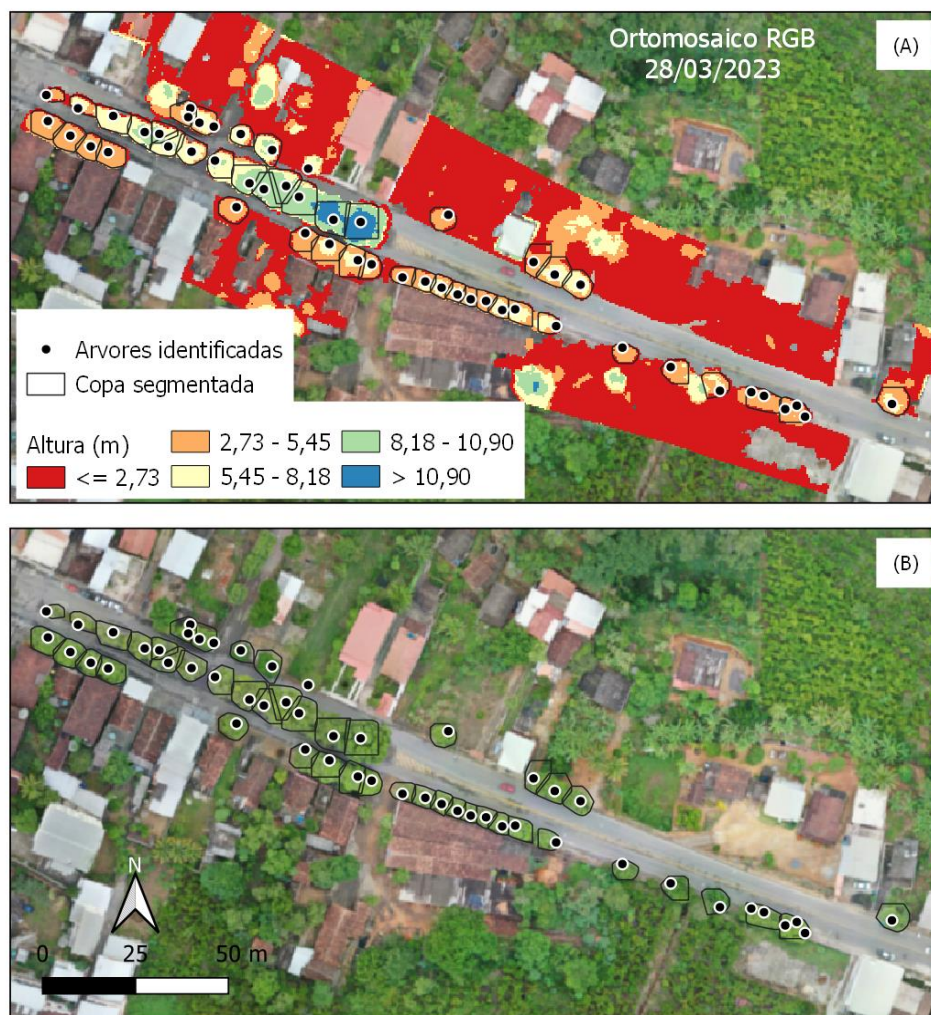
Fonte: o autor

O melhor algoritmo foi o de janela variável (wV) (Tabela 7), que utiliza a nuvem de pontos como fonte, e varia o tamanho da janela durante o escaneamento da área. O fato do melhor resultado ter como base a nuvem de pontos pode ser explicado pelo CHM ser uma variação da nuvem de pontos, que já obtém um certo erro. Esse algoritmo foi capaz de reconhecer 78% dos indivíduos de interesse. Algumas particularidades podem explicar o porquê desses resultados. Há casos em que houve uma poda drástica das copas das árvores, deixando-as com poucas folhas e, com isso, dificultando a visualização nas imagens aéreas. Outras particularidades são as sombras causadas devido à proximidade com edifícios e a ocultação da copa das árvores de interesse por outras copas de indivíduos que não estão contemplados na área de estudo ou até mesmo por edificações. Ainda cabe citar o adensamento das copas, dificultando a separação da copa entre dois indivíduos devido a sobreposição das mesmas.

Apesar disso, comparando o valor encontrado com o de outros autores, o valor é satisfatório. Em Almeida *et al.* (2021) foram detectadas 97,6% das árvores em um plantio de eucalipto jovem, com 1,5 anos, e espaçamento de 3 m x 2 m. Já em Paulo (2023), foram identificadas 68,8% das árvores em um sistema silvipastoril, composto por uma plantação de eucalipto e capim-marandu, onde a espécie arbórea encontrava-se em um espaçamento de 3 m x 2 m com idade de cinco anos. As áreas citadas anteriormente indicam que a detecção das árvores no presente trabalho são aceitáveis, visto que há uma homogeneidade de espécies e idades das árvores, sem um padrão de copa definido.

Após a verificação do melhor algoritmo de detecção, a segmentação das copas foi realizada (Figura 10). Todas as árvores identificadas tiveram suas copas segmentadas e a avaliação da área obtida, encontra-se no item 4.4.

Figura 10. Segmentação automática das copas das árvores em parte da área de estudo.



Fonte: o autor

4.4 Avaliação do diâmetro de copa (d_c)

Os resultados das avaliações dos diâmetros de copa estão apresentados na Tabela 8. Levando em consideração que os valores obtidos do d_c por meio da fotogrametria, classificados de forma manual, foram considerados como padrão, por apresentarem a copa o mais próximo do real.

Tabela 8. Estatísticas para avaliação do diâmetro de copa.

Comparações	RMSE (m)	RMSE (%)	V (m)	V (%)	r
Manual x 4 raios	1,30	17,94	-0,60	-8,30	0,79
Manual x 8 raios	1,64	21,20	-1,09	-14,08	0,78
Manual x Automática	2,14	29,50	-1,72	-23,66	0,73

Em que: RMSE: raiz do quadrado médio do erro; V: viés; R²: coeficiente de determinação.

Fonte: o autor

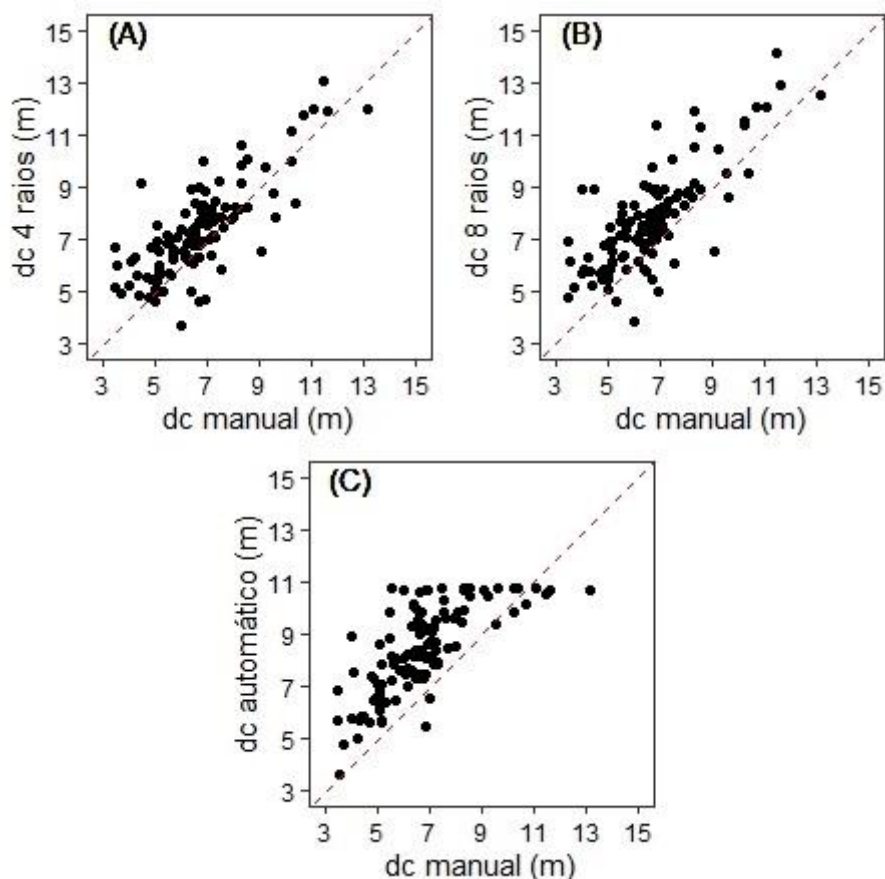
Para os dados referentes à comparação entre campo e detecção manual, utilizando a imagem obtida na fotogrametria, houve diferença variando de 18% e 21%, aproximadamente, utilizando quatro e oito raios. O viés foi negativo, o que pode indicar uma superestimação dos valores referentes ao método manual, como observado na Figura 11A e 11B. Esse resultado pode ser explicado pela dificuldade em se medir os raios em campo. Em alguns casos, as copas das árvores ultrapassaram os muros e parte das copas estavam dentro de propriedades privadas, tendo a necessidade de se estimar de forma visual os valores.

Sabe-se que a fórmula utilizada para obtenção da área de copa com os dados do inventário urbano é geralmente a fórmula da área de um círculo. Entretanto, sabe-se que, a copa da árvore não tem um padrão circular perfeito. Já os valores obtidos de forma manual, as copas foram segmentadas contornando todos os lados, podendo ser considerados mais próximos do verdadeiro valor da área das mesmas. Jensen (2011) e Lima Neto *et al.* (2010) obtiveram as mesmas dificuldades e levantaram os mesmos pontos referentes aos erros em relação à área de copa apontadas neste trabalho.

Já na metodologia que utiliza os diâmetros de copa obtidos de forma automática (por meio das métricas tradicionais e da segmentação das copas), houve superestimação dos valores de diâmetro de copa em quase todas as árvores medidas (Figura 11C), o que não ocorreu nos demais métodos analisados (Figuras 11A e 11B). Nota-se também que houve uma limitação nas medidas, ao alcançarem valores próximos à 11 m. Uma possível explicação para este fato é a dificuldade em detectar os limites das copas das árvores em imagens aéreas, devido ao sombreamento causado por edificações e aparatos

urbanos pelo adensamento das copas. Isso pode gerar valores maiores que os encontrados de forma manual, onde se tem uma análise em cada copa, sendo possível em alguns casos detectar os limites das copas.

Figura 11. Gráficos dos diâmetros de copa (A): obtidos de forma manual e em campo com 4 raios; (B): de forma manual e em campo com 8 raios; e (C): de forma manual e de forma automática (obtidos pelas métricas tradicionais e segmentação das copas).



Fonte: o autor

4.5 Modelagem das variáveis biométricas

Os modelos de regressão múltipla gerados para estimar os valores de altura total (H), diâmetro do tronco (D) e diâmetro de copa (d_c), a partir das métricas tradicionais estão apresentados na Tabela 9. As estatísticas de

desempenho dos modelos são apresentadas na Tabela 10. Como os dados de d_c campo, foram utilizados o método de oito raios.

Tabela 9. Modelos de regressão múltipla gerados para as variáveis estudadas.

Variável	Coefficientes	Modelo
<i>H</i>	$\hat{\beta}_0 = 8,0588^*$	$H = \beta_0 + \beta_1 \text{ hskew} + \beta_2 \text{ phabove2} + \beta_3 \text{ hp25} + \beta_4 \text{ hp90} + \beta_5 \text{ hpcum2} + \beta_6 \text{ area} + \varepsilon$
	$\hat{\beta}_1 = - 0,7369^*$	
	$\hat{\beta}_2 = - 0,0914^*$	
	$\hat{\beta}_3 = - 0,1285^*$	
	$\hat{\beta}_4 = 1,0354^*$	
	$\hat{\beta}_5 = - 0,0806^*$	
<i>D</i>	$\hat{\beta}_6 = - 0,0073^{\text{ns}}$	$D = \beta_0 + \beta_1 \text{ phabovehmean} + \beta_2 \text{ hp15} + \beta_3 \text{ hpcum4} + \beta_4 \text{ hpcum9} + \beta_5 \text{ area} + \varepsilon$
	$\hat{\beta}_0 = - 70,1908^*$	
	$\hat{\beta}_1 = 0,6824^*$	
	$\hat{\beta}_2 = 1,6890^*$	
	$\hat{\beta}_3 = 0,7229^*$	
	$\hat{\beta}_4 = 0,3408^*$	
d_c	$\hat{\beta}_5 = 0,1690^*$	$d_c = \beta_0 + \beta_1 \text{ phabove2} + \beta_2 \text{ hp25} + \beta_3 \text{ hp55} + \beta_4 \text{ hpcum1} + \beta_5 \text{ area} + \varepsilon$
	$\hat{\beta}_0 = 11,1256^*$	
	$\hat{\beta}_1 = - 0,0900^*$	
	$\hat{\beta}_2 = - 0,3250^*$	
	$\hat{\beta}_3 = 0,6741^*$	
	$\hat{\beta}_4 = - 0,1921^*$	
	$\hat{\beta}_5 = 0,0431^*$	

Em que: *H*: altura total; *D*: diâmetro à 1,3 m do solo; d_c : diâmetro de copa; hskew: assimetria da distribuição de altura; phabove2: porcentagem de retorno acima de 2 m de altura; hpn: n-ésimo percentil da distribuição de altura; hpcumn: percentil acumulado de retorno na n-ésima camada; phabovehmean: porcentagem de retorno acima da altura média; area: área de copa, ns: não significativo.

Estatísticas significativas à 5% (0,05).

Fonte: o autor

Tabela 10. Estatísticas obtidas dos modelos de estimativa para as variáveis estudadas.

Variável	BIC	RMSE	RMSE (%)	R ² ajustado
<i>H</i> (m)	-243,00	0,65	8,97	0,90
<i>D</i> (cm)	6,00	10,34	36,76	0,14
<i>d_c</i> (m)	-72,00	1,21	15,68	0,57

Em que: *H*: altura total; *D*: diâmetro à 1,3 m do solo; *d_c*: diâmetro de copa; BIC: critério bayesiano de informação; RMSE: raiz do quadrado médio do erro; V: viés; R²: coeficiente de determinação.

Fonte: o autor

Verifica-se que, no modelo para estimar a altura total, foram selecionadas as métricas que analisam a árvore desde seções inferiores (hp25) às superiores (hp90, phabove2), além de sua distribuição na área (area) e na altura dos pontos das árvores em geral (hskew). Para o modelo de estimação de diâmetro à 1,3 m do solo (*D*), as métricas utilizadas no modelo foram porcentagem de retorno acima da altura média, distribuição de altura no percentil 15, percentil acumulado de retorno na quarta e nona camada e área de copa. As variáveis utilizadas no modelo mostram uma relação à altura em que o diâmetro de interesse está (1,3 m), uma vez que as métricas de altura selecionadas se relacionam com a base da árvore. Uma exceção é a área de copa, que pode ser explicada pelo desenvolvimento da árvore, além da relação entre diâmetro da copa e o diâmetro do tronco. Já para o modelo de diâmetro de copa, as variáveis analisaram todas as camadas da árvore, desde as inferiores (percentil 25 e percentil acumulado de retorno na primeira camada), até as medianas (percentil 55) e nas superiores (porcentagem de retorno acima de dois metros de altura), além da área de copa.

Ao analisar as estatísticas de acurácia (Tabela 10), nota-se que o erro encontrado foi baixo (<9%) e o R² alto, e que o modelo foi acurado para a estimação da altura total das árvores da arborização da área analisada.

Cabral *et al.* (2023) ao estudar a altura total média e diâmetro do tronco à 1,3 m do solo médio em áreas de Mata Atlântica, encontrou valores de RMSE de 2,63 m e 15,92% e um R² de 0,85, sendo que o resultado foi considerado aceitável para estimar altura total média. Almeida *et al.* (2020), na estimativa da estrutura de uma florestal tropical secundária de Mata Atlântica no nordeste brasileiro, obtiveram RMSE de 2,5 m (24,2%). Wang *et al.* (2021), ao analisarem

a altura total das árvores em um Parque Florestal Nacional, na China, encontraram que valores de R^2 de 0,99 e erro de 0,2 m e concluíram que a precisão foi alta e é possível obter a variável por meio de dados FAD-RPA.

Para o D , o RMSE encontrado foi alto e o R^2 baixo (0,14), apresentando baixa acurácia. Almeida *et al.* (2020), em um fragmento florestal tropical, de Mata Atlântica encontraram RMSE de 2,8%. A baixa acurácia encontrada pode ter ocorrido devido no ambiente urbano os indivíduos sofrerem podas constantes, não permitindo que a relação diâmetro e altura seja explorada.

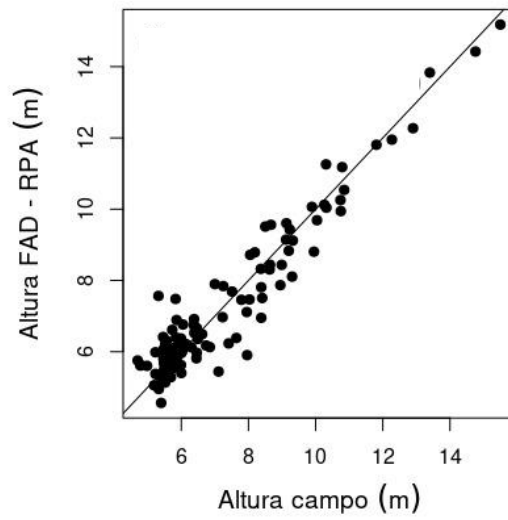
Isibuea; Pingelb (2020), em uma área urbana em Chicago, EUA, ao avaliarem a influência das copas das árvores na medição de diâmetro à 1,3 m do solo das árvores urbanas, concluíram que a densidade das copas impedia a visibilidade do tronco, dificultando a obtenção de imagens claras e, portanto, dos dados, obtendo então valores melhores quando as copas não eram densas.

O modelo de diâmetro de copa teve RMSE e R^2 medianos. Wang *et al.* (2021), ao analisarem o diâmetro de copa das árvores em um Parque Florestal Nacional, na China, encontraram valores de R^2 de 0,86 e concluíram que a precisão foi alta mas que a RPA subestimou os valores de campo.

A área de copa na arborização urbana é utilizada para índices de vegetação, avaliação do desenvolvimento das árvores e muitas vezes nem são mensuradas, somente analisadas em presença ou ausência de conflitos com os aparatos urbanos. Diante disso, o erro encontrado no modelo mostra ser aceitável para estimar as áreas de copa quando este for o objetivo neste tipo de inventário, mesmo tendo valores de RMSE maiores que Wang *et al.* (2021).

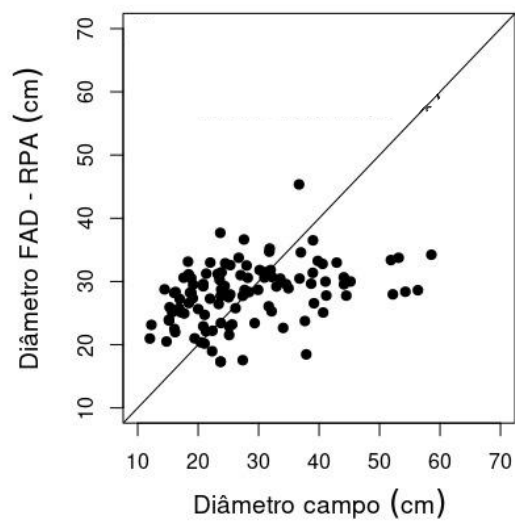
Nas Figuras 12, 13 e 14 estão os gráficos de valores obtidos pela FAD-RPA versus valores obtidos em campo das variáveis H , D e d_c , respectivamente. Não houve tendência na estimação dos valores de H (Figura 12). Para D , as árvores com maiores valores em campo foram subestimadas no método FAD (Figura 13). Árvores com diâmetros de copa maiores em campo obtiveram uma subestimação dos valores FAD, enquanto para diâmetros menores que 10 m, não houve tendência (Figura 14).

Figura 12. Gráficos de dispersão entre os valores de H estimados e observados.



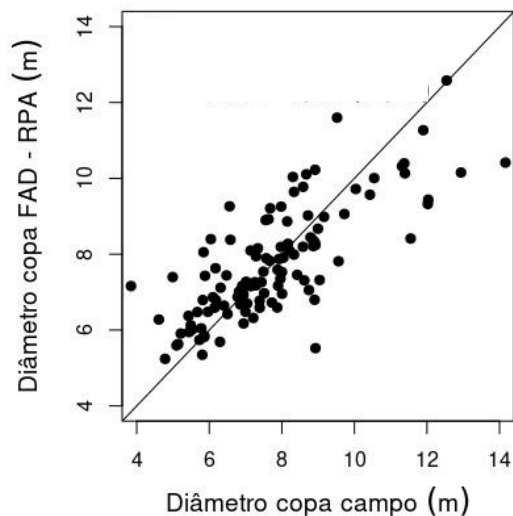
Fonte: o autor

Figura 13. Gráficos de dispersão entre os valores de D estimados e observados.



Fonte: o autor

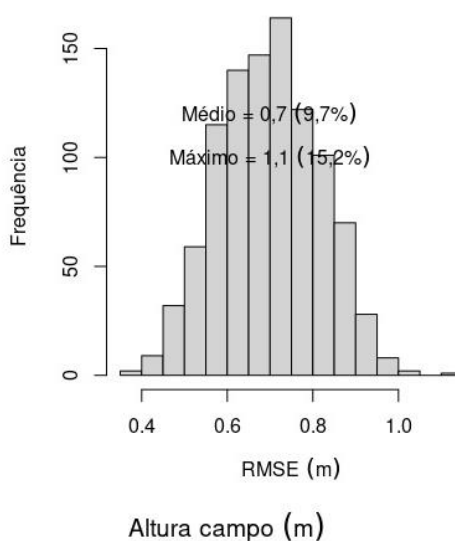
Figura 14. Gráficos de dispersão entre os valores de d_c estimados e observados



Fonte: o autor

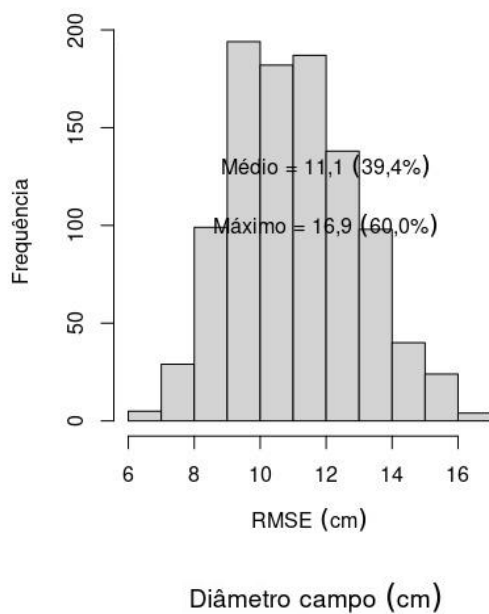
Após analisar a multicolinearidade das variáveis ($VIF < 10$), verificou-se que este problema não foi detectado para os modelos de regressão analisados. Assim, foi realizada a validação cruzada. Os resultados da validação dos modelos são apresentados nas Figuras 15, 16 e 17, respectivamente para H , D e d_c e corroboraram os valores de RMSE encontrados no ajuste (Tabela 10), apresentando valores médios semelhantes.

Figura 15. Histograma de frequência de RMSE na validação de modelos para H .



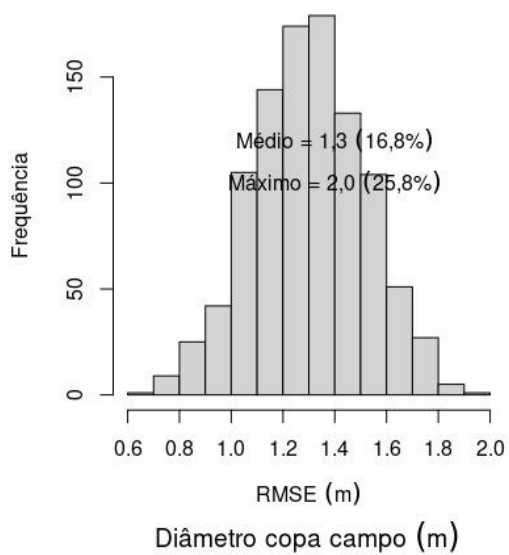
Fonte: o autor

Figura 16. Histograma de frequência de RMSE na validação de modelos para D .



Fonte: o autor

Figura 17. Histograma de frequência de RMSE na validação de modelos para d_c .



Fonte: o autor

5 CONCLUSÕES

Por meio do levantamento feito por fotogrametria aérea digital podem ser identificadas de forma automática as árvores e extrair métricas tradicionais que são utilizadas para geração de modelos matemáticos para obtenção de variáveis de interesse. A geração de um modelo digital de terreno, que é uma dificuldade da FAD-RPA, não foi um problema para a arborização urbana, pois esta é uma área com vegetação esparsa. Isso ocasionou um bom resultado para a obtenção da altura das árvores por meio da FAD-RPA. A detecção automática dos indivíduos, de acordo com os métodos analisados, foi melhor quando o algoritmo utiliza a nuvem de pontos como fonte. O algoritmo com o melhor desempenho para detecção automática das árvores foi o de janela variável (wV). Para a variável diâmetro de copa, dados obtidos de forma manual, apresentaram valores considerados satisfatórios, sendo considerado o melhor método de obtenção para esta variável. Os modelos de regressão ajustados com as métricas tradicionais obtidas para os modelos de altura total e diâmetro da copa foram consideradas satisfatórias e o modelo de diâmetro a 1,3 m do solo apresentaram estimativas com baixa acurácia.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTIN, R. M. *et al.* Arborização de acompanhamento viário e parâmetros de ocupação do solo: método para levantamento de dados qualiquantitativos. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**. v. 12, p. 1-20, 2020.

ALMEIDA, A. *et al.* Estimating structure and biomass of a secondary Atlantic forest in Brazil using fourier transforms of vertical profiles derived from UAV photogrammetry point clouds. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 3560-3685, 2020.

ALMEIDA, A. *et al.* Individual tree detection and qualitative inventory of a Eucalyptus sp. stand using UAV photogrammetry data. **Remote Sensing**. v. 13, n. 18, p. 3655-3676. 2021.

ANDRADE, Rubens. **A construção da paisagem urbana no Brasil: processos e práticas da arborização**. In: TERRA, Carlos Gonçalves (Coord.). Arborização: ensaios historiográficos. Rio de Janeiro: EBA/UFRJ, 2004, p. 73-129.

BACELAR, W. J. L. *et al.* Diagnóstico qualiquantitativo da arborização urbana da cidade de Monte Alegre, Pará, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 1019 – 1031, 2020.

BIONDI, D. **Arborização urbana aplicada à educação ambiental nas escolas**. Curitiba: O autor, 2008. 120 p.

BIONDI, D.; ALTHAUS, M. **Árvores de rua de Curitiba: cultivo e manejo**. Curitiba: FUPEF, 2005. 175 p.

BISPO, P. C. *et al.* Woody aboveground biomass mapping of the brazilian savanna with a multi-sensor and machine learning approach. **Remote Sensing**, v.12, n.17, p.2685, 2020.

BOBROWSKI, R. **Inventário florestal contínuo e dinâmica da arborização de ruas**. In: BIONDI, D.; LIMA NETO, E. M. Pesquisa em arborização de ruas. Curitiba: O autor, 2011. p. 91 – 110.

CABRAL, R. P. *et al.* Mapping of the successional stage of a secondary forest using point clouds derived from UAV photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 15, n. 2, p. 509 – 538, 2023.

CARDOSO, K. M. *et al.* Uso de espécies da arborização urbana no biomonitoramento de manutenção ambiental. **Ciência Florestal**, v.27, n.2, p.535-547, 2017.

CARVALHO, R. C. **Inventário de uma floresta de produção com a utilização de imagens msi/sentinel-2 e fotogrametria aérea digital**. 2021. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2021.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Manual de arborização**. Belo Horizonte. 2011. 112p.

CORREIA FILHO, W. L. F. *et al.* Analysis of environmental degradation in Maceió-Alagoas, Brazil via orbital sensors: a proposal for landscape intervention based on urban afforestation. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 24, 2021.

DALPONTE, M.; COOMES, D.A. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 7, p. 1236 – 1245, 2016.

DANDOIS, J. P., ELLIS, E. C. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1157–1176, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/rs2041157>. Acesso em: 03 jul. 2023.

DECEA. MINISTÉRIO DA DEFESA COMANDO DA AERONÁUTICA. n 415/DGCEA, de 9 de novembro de 2015. **ICA 100-40**, que trata dos “Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro”. Publicado no BCA n° 212, de 19 de novembro de 2015.

DUARTE, T. E. P. N. *et al.* Reflexões sobre arborização urbana: desafios a serem superados para o incremento da arborização urbana no Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 1, p. 327-341, 2018.

FERNANDES, C. J. *et al.* Trees description in the main square of São José do Rio Preto, São Paulo State, Brazil. **Ornamental Horticulture**, v. 24, n. 4, p. 334-340, 2018.

FERREIRA, R. M. **Arborização em ambientes urbanos: inventário florestal em condomínio residencial no município de Foz do Iguaçu**. 66 p. Monografia (Pós-graduação em Gestão Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. A. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina dos textos, 2017.

GEORGOPOULOS, N. *et al.* Total stem biomass estimation using sentinel-1 and -2 data in a dense coniferous forest of complex structure and terrain. **Forest**. v. 13, p. 2157-2175, 2022.

GOMES, M. F., QUEIROZ, D. R. E. Avaliação da cobertura arbórea na cidade de Birigui com emprego de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, **Revista Geografar**, v.6, n.2, p.93-117, 2011.

GONÇALVES, F. *et al.* Estimating aboveground biomass in tropical forests: field methods and error analysis for the calibration of remote sensing observations. **Remote Sensing**, v.9, n.47, p.1-23, 2017.

GONG, C., CHEN, J., YU, S. Biotic homogenization and differentiation of the flora in artificial and near-natural habitats across urban green spaces. **Landscape and Urban Planning**, v. 120, p. 158–169. 2013.

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, p. 55-75, 2019.

GOODBODY, T. R. H. *et al.* Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. **The Forestry Chronicle**, v. 93, p. 71-81, 2017.

GRANSHAW, S. I. Photogrammetric terminology: third edition. **Photogrammetric Record**, v. 31, n. 154, p. 210–252, 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. **População brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões de habitantes, aponta censo 2022**. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/materias-especiais/21972-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes-de-habitantes-aponta-censo-2022.html>>. Acesso em: 15 ago, 2023.

INCAPER – Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Proater 2020 – 2023**. Disponível em: <https://incaper.es.gov.br/media/incaper/proater/municipios/Jeronimo_Monteiro.pdf>. Acesso em: 30 ago, 2023.

ISIBUE, E. W., PINGELB, T. J.. Unmanned aerial Vehicle based measurement of urban forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 52, 2020.

JENSEN, R. J. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 2 ed. California: Parentese, 2011.

JOHNSON, M. T. J., THOMPSON, K. A., SAINI, H. S. Plant evolution in the urban jungle. **American Journal of Botany**, v. 102, n. 12, p. 1951 – 1953, 2015.

KHOSRAVIPOUR, A. et al. Gnerating pit-free canopy height models from airborne lidar. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 80, n. 9, p. 863 – 872. 2014.

KOMÁREK, J. *et al.* The Potential of widespread UAV cameras in the identification of conifers and the delineation of their crowns. **Forests**. v. 13, p. 710–724, 2022.

KURIHARA, D. L.; ENCINAS, J. I. Análise da arborização do campus da Universidade de Brasília através de imagens Ikonos. **Brasil Florestal**, v. 23, n. 78, p. 81-87, 2003.

LEAL, L., BIONDI, D., BATISTA, A. C. Influência das florestas urbanas na variação termo-higrométrica da área intraurbana de Curitiba – PR. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 807 – 820, 2014.

LEBERL, F. *et al.* Point clouds. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 76, n. 10, p. 1123–1134, 2010.

LIMA NETO, E. M. L. *et al.* Aplicação do SIG na arborização viária – unidade amostral em Curitiba-PR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3, 2010, Recife. **Anais...** Recife: UFPE – Departamento de Geomática, 2010.

LIMA NETO, E. M. **Aplicação do sistema de informações geográficas para o inventário da arborização de ruas de Curitiba, PR.** 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

LIMA NETO, E. M. *et al.* Fotografias aéreas para mensuração da área de copa das árvores de ruas de Curitiba - PR. **Floresta**, v. 42, p. 577 - 588, 2012.

LINS, B. O. L. **A utilização do VANT (drone) como alternativa para atualização de regularização urbana.** 2019. 54 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Agrimensura) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2019.

LOBATO, L. J. T. *et al.* Levantamento dendrológico em ambiente urbano de Rive, distrito de Alegre - ES. **Caderno de Pesquisa**, v. 31, n. 3, p. 12-21, 2020.

LOOSE, D. **Análise e validação do levantamento topográfico planimétrico com uso das tecnologias estação total, GNSS RTK e RPA.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2022.

LUMLEY, T. **Package “leaps”: regression subset selection.** Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/leaps/leaps.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2023.

MAGALHÃES, L. M. S. Arborização e florestas urbanas – terminologia adotada para a cobertura arbórea das cidades brasileiras. **Série Técnica Floresta e Ambiente**, v. 0, p.23-26, 2006.

MARTINS, M. T. *et al.* Uso de veículo aéreo não tripulado para extração de variáveis biométricas em um pomar de *Olea europaea* L. **Conjecturas**, v. 22, n. 18, p. 523, 2022.

MORAIS, R. M. **Sensoriamento remoto e classificação de imagens**. 1999. Disponível em: <<http://www.de.ufpb.br/~ronei/procimagem/procimagem.htm>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

NÄSI, R. *et al.* Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 15467– 15493, 2015.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. p. 388.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. *et al.* Non-parametric tests and multivariate analysis applied to reported dengue cases in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 191, n. 7, 2019.

PAIVA, A. V. *et al.* Inventário e diagnóstico da arborização urbana viária de Rio Branco, AC. **Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 5, p. 144–159, 2010.

PAIVA, P. D. O. *et al.* Performance of native species in urban afforestation of public pathways in Lavras-MG, Brazil. **Ornamental Horticulture**, v. 28, n. 2, p. 161-171, 2022.

PAUL, M. J.; MEYER, J. L. Streams in the urban landscape. **Urban ecology**, Amsterdam, v. 32, p. 207-231, 2008.

PAULO, M. V. **Detecção individual de árvores e estimativa de altura total em um sistema silvipastoril de eucalipto e capim marandu por meio da fotogrametria aérea digital**. 45 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2023.

PEBESMA, E.; BIVAND, R. **Spatial data science with applications in R**. Disponível em: <<https://keen-swartz-3146c4.netlify.app/older.html>>. Acesso em: 05 set, 2023.

POPESCU, S.; WYNNE, R.. Seeing the trees in the forest: using Lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for

estimating tree height. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 70, p. 589-604, 2004.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>. Acesso em: 05 set, 2023.

READ, J. M.; TORRADO, M. **Remote Sensing**. In: KITCHIN, R.; THRIFT, N. *International Encyclopedia of Human Geography*, Elsevier, 2009. p. 335–346.

RIBEIRO, H. J., *et al.* Sensoriamento remoto em ecologia da paisagem: estado da arte. **Geociências**, v. 38, p. 257-267, 2019.

ROCHA, E. J. P. *et al.* **Sensoriamento remoto**: princípios e aplicações em recursos naturais e meio ambiente. Viçosa: UFV, 2020.

ROLLO, L. C. P. **Metodologias de quantificação de áreas verdes urbanas**: mapeamento da cobertura arbórea e inventário florestal de árvores de rua em cidades do Estado de São Paulo. 2014. 106 p. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2014.

ROUSSEL, J. R.; GOODBODY, T. R. H.; TOMPALSKI, P. **The lidR package**. 2022. Disponível em: <https://r-lidar.github.io/lidRbook/index.html>. Acesso em: 04 set. 2023.

SANQUETTA, C. R. *et al.* **Inventários florestais**: planejamento e execução. Curitiba: Multi-Graphic Gráfica e Editora, 2006.

SARTORI, R. A. *et al.* Urban forestry in the south area of Rio de Janeiro: the society, the species and the damage to urban infrastructure. **Rodriguésia**. v. 72. p 1-10, 2021.

SILVA, A. G., PAIVA, H. N., GONÇALVES, W. **Avaliando a arborização urbana**. 2. ed. v. 5. Viçosa: Aprenda Fácil, 2017.

SILVA, G. M. A. **Metanálise sobre os planos diretores de arborização urbana em diferentes localidades do Brasil**. 2018. 70 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro. 2018.

SILVA, L. B. D. *et al.* Uso de imagens obtidas por drone para o mapeamento da cobertura florestal na área urbana de Alta Floresta - MT In: Seminário de Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos: Biodiversidade e a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta nos Agroecossistemas Amazônicos, 7., 2019, Alta Floresta/MT. **Anais...** Alta Floresta/MT: Programa de Pós Graduação Stricto Sensu em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos - PPGBioAgro, 2019.

SILVA FILHO, D. F. **Silvicultura urbana**: O desenho florestal da cidade. 2003. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistorico/informacoestecnicas/silvicultura_urbana_o_desenho_florestal_da_cidade.aspx>. Acesso em: 17 ago. 2023.

SON, N. T., CHEN, C. F., CHEN, C. R. Urban expansion and its impacts on local temperature in San Salvador, El Salvador. **Urban Climate**, v. 32, 2020.

SOUZA, L. C. M. **Análise quali-quantitativa das áreas verdes urbanas do bairro Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ**. 2018. 61f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2018.

SOUZA, R. B. *et al.* **Sensoriamento remoto e geoprocessamento no estudo da cobertura vegetal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SWINFIELD, T. *et al.* Accurate measurement of tropical forest canopy heights and aboveground carbon using structure from motion. **Remote Sensing**, v. 8, n. 11, p. 928, 2019.

TEJADA, P. J. Z. *et al.* Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial Vehicle (UAV) and automatic 3D phot-reconstruction methods. **European Journal of Agronomy**, v. 55, p. 89-99, 2014.

TOLEDO, J. A. M. *et al.* History, landscape, and botanical report of a centenary square in Brazil. **Ornamental Horticulture**, v. 27, n. 2, p. 162-172, 2021.

TOMMASELLI, A. M. GARCIA. Fotogrametria básica. In: **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente: UNESP, 2009. p. 5–18.

TOMMASELLI, A. M. G *et al.* **Fotogrametria**: aplicações a curta distância. In: MENEGUETE JUNIOR, M., ALVES, N. FCT 40 anos, Perfil Científico – Educacional, Presidente Prudente, p. 147-159, 1999.

TRINDADE, E. G. B. **O que é fotogrametria digital no mapeamento aéreo com drones?**. 2021. Disponível em: <<https://geosense.net.br/2021/08/20/o-que-e-fotogrametria-digital-no-mapeamento-aereo-com-drones/>>. Acesso em: 29 ago, 2023.

UCELLA-FILHO, J. G. M. *et al.* Biodiverse neighborhoods: an ex-situ conservation tool. **Ornamental Horticulture**. v. 28, n. 1, p. 8-18, 2022.

VARGAS, R. M. DE A. **Avaliação dos dados laser scanner para determinar modelos de terreno em áreas cobertas por floresta ombrófila densa alterada na Amazônia**. 2007. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

VASCONCELLOS, B. N. DE. **Estimativa de variáveis dendrométricas individuais de *Araucaria angustifolia* por meio de dados laser scanner aéreo e terrestre**. 2017. 185 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

VIGNOLA JUNIOR, R. ArbVias – Método de avaliação da arborização no sistema viário urbano. **Paisagem e Ambiente: Ensaios**, n.35, p. 89 – 117, 2015.

WANG, X. *et al.* Urban forest monitoring based on multiple features at the single tree scale by UAV. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 58, 2021.

WANG, Y.; KOCH, B. A lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modelling in forest. **Sensors**, v. 8, n. 6, p. 3938–3951, 2008.

WHITE, J. C. *et al.* A model development and application guide for generating an enhanced forest inventory using airborne laser scanning data and an area-based approach. **Canadian Forest Service**, Information Report FI-X-018. 2017.

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.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with application in GIS**. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

ZAMBONATO, B. *et al.* Proposta de método de inventário da arborização urbana. **Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Curitiba, v. 16, n. 4, p. 74 – 93, 2021.

ZHU, Q. Photogrammetry education for multidisciplinary geomatics in China. **Geo-spatial Information Science**, v. 9, n. 4, p. 273–280, 2006.