

ARTIGO ORIGINAL

Estimativa de altura de um teste clonal de *Eucalyptus* em diferentes idades utilizando imagens aéreas de baixa altitude

Height estimation of a clonal Eucalyptus test at different ages using low-altitude aerial imaging

Maurício Martello¹ , Clayton Alcarde Alvares^{2,3} , Tiago Rodrigues Tavares¹ , Peterson Ricardo Fiorio¹ , Otávio Camargo Campoe^{2,4} , Rafaela Lorenzato Carneiro⁵ 

¹Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba, SP, Brasil

²Universidade Estadual Paulista – UNESP, Botucatu, SP, Brasil

³Suzano SA, Limeira, SP, Brasil

⁴Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, MG, Brasil

⁵Plantse Treinamento e Consultoria Ltda, Ribeirão Preto, SP, Brasil

Como citar: Martello, M., Alvares, C. A., Tavares, T. R., Fiorio, P. R., Campoe, O. C., & Carneiro, R. L. (2022). Estimativa de altura de um teste clonal de *Eucalyptus* em diferentes idades utilizando imagens aéreas de baixa altitude. *Scientia Forestalis*, 50, e3762. <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.07>

Resumo

Este trabalho avaliou o desempenho da estimativa da altura de *Eucalyptus* utilizando imagens aéreas obtidas com aeronave remotamente pilotada (RPA). A área de estudo faz parte da rede experimental do Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico Térmico e Biótico (TECHS-IPEF). Foram realizadas quatro coletas de imagens aéreas, em estágios diferentes de desenvolvimento das plantas, avaliando 15 parcelas experimentais, cada uma com um clone diferente de *Eucalyptus*. As parcelas continham 5 linhas, espaçadas a 2,3 m, com 4 plantas em cada linha (espaçadas também a 2,3 m), totalizando 20 árvores e 5,06 m² por planta. Para obtenção das imagens, foram utilizadas aeronaves com câmeras digitais com sensibilidade na região espectral do visível (RGB). As imagens eram sincronizadas com um sistema de navegação global por satélite (GNSS) para o georreferenciamento das informações. A aquisição de imagens estereoscópicas permitiu a geração de modelos tridimensionais que foram utilizados na estimativa da altura de cada planta de eucalipto, em cada uma das quatro coletas de imagens. Por meio de regressões lineares simples, altura estimada com as imagens do RPA foram comparadas com medidas de altura obtidas a campo. Os resultados mostraram um desempenho da estimativa da altura via imagens aéreas com valores de coeficiente de determinação (R²) superiores a 0,75 e raiz do erro quadrático médio (RMSE) inferiores a 3,94 m. Conclui-se que a estimativa de altura utilizando imagens aéreas demonstram o alto potencial para o monitoramento e avaliação dos clones de *Eucalyptus*, podendo ser uma ferramenta utilizada no apoio a gestão destas áreas.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Geoprocessamento; Aeronave remotamente pilotada.

Abstract

This study evaluated the performance of the estimation of *Eucalyptus* height using aerial images obtained with a remotely piloted aircraft (RPA). The study area is part of the Cooperative Program on Tolerance of Clonal *Eucalyptus* by Thermal and Biotic Water Stresses (TECHS-IPEF). Four aerial image acquisitions were carried out at different stages of plant development, evaluating 15 experimental plots, each with a different clone of *Eucalyptus*. The plots contained 5 rows, spaced at 2.3 m, with 4 plants in each row (also spaced at 2.3 m), totaling 20 trees and 5.06 m² per plant. The image acquisition was done using aircrafts

Fonte de financiamento: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. O terceiro autor foi financiado pela Fundação de Pesquisa de São Paulo (FAPESP), projeto nº 2020/16670-9.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

Autor correspondente: mauriciomartello@gmail.com

Recebido: 1 setembro 2021.

Aceito: 8 março 2022.

Editor: Mauro Valdir Schumacher.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o artigo científico seja corretamente citado.

with digital cameras that had a sensitivity in the visible spectral region (RGB). The images were synchronized with a global navigation satellite system (GNSS) receiver for geo-referencing the information. The acquisition of stereoscopic images allowed the generation of three-dimensional models that were used to estimate the height of each eucalyptus plant, in each of the four image collections. The heights estimated with the RPA images were compared with height measurements performed in the field by means of linear regressions. The results showed an estimation performance with a coefficient of determination (R^2) value higher than 0.75 and root mean square error (RMSE) lower than 3.94 m. It is concluded that height estimation using aerial images has a high potential for monitoring and evaluation *Eucalyptus* clones, and can be a useful tool to support the management of these areas.

Keywords: Remote sensing; Geo-processing; Remotely piloted aircraft.

1. INTRODUÇÃO

O uso de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) para estimativa de atributos florestais (e.g., altura, volume de madeira, vigor vegetativo, etc) tem aumentado nas últimas décadas (Jakubowski et al., 2013; Bolton et al., 2018). Uma de suas vantagens chave é sua capacidade de monitoramento em larga escala, o que permite a atenuação de custos nos inventários florestais tradicionais (Tomppo et al., 2008; Matasci et al., 2018).

Metodologias utilizando imagens orbitais e sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) aerotransportados têm sido propostas em diferentes países como dados auxiliares às medidas de campo realizadas em inventários florestais (Næsset, 2002; Tomppo et al., 2008; Macedo et al., 2017). Dentre as diferentes ferramentas do SR, a tecnologia LiDAR aerotransportada ganhou popularidade no setor florestal, como meio de obter medições tridimensionais detalhadas da estrutura do dossel de plantas, permitindo mensurar a altura de árvores e arbustos, distribuição vertical do dossel e a topografia abaixo do dossel de plantas, bem como predições indiretas, inferindo sobre atributos como a área basal, biomassa e estoques de carbono (Görgens et al., 2015; Wulder et al., 2012).

Diversos estudos têm comprovado a eficiência da tecnologia LiDAR para a avaliação de parâmetros em povamentos florestais (d'Oliveira et al., 2012; Silva et al., 2015, 2016, 2017). Contudo, a sua adoção ainda é limitada devido ao seu custo elevado, principalmente em inventários realizados em média e pequena extensões de área (Jakubowski et al., 2013; Silva et al., 2017). Neste sentido, a utilização de câmeras RGB embarcadas em aeronaves remotamente pilotadas (RPA) é uma alternativa de baixo custo para capturar a estrutura tridimensional de estandes florestais e auxiliar na realização de inventários florestais (Puliti et al., 2015; Wallace et al., 2016), principalmente em áreas de pequena e média extensão (Hunt Junior & Daughtry, 2018).

A associação de técnicas de visão computacional e fotogrametria, tal como *structure from motion* (SfM), permite a geração de nuvens de pontos tridimensional a partir do processamento de imagens (Wallace et al., 2016). Esta técnica utiliza o princípio da estereoscopia, utilizando características geométricas capturadas em múltiplas imagens obtidas em diferentes ângulos de visada para gerar uma nuvem de pontos 3D (Snavely et al., 2008). O desenvolvimento de softwares que utilizam essa técnica, tal como Photoscan (e.g., Turner et al., 2012), permitem a geração de modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) de forma prática e acessível (Whitehead & Hugenholtz, 2014). Nuvens de pontos geradas tanto com LiDAR, quanto com a técnica de SfM, têm mostrado desempenhos satisfatórios para avaliação de atributos florestais, tal como altura, dimensões da copa e biomassa (Dandois & Ellis, 2013). Além disso, alguns trabalhos têm observado desempenhos semelhantes para a predição de parâmetros geométricos de espécies florestais, sugerindo a utilização de imagens aéreas para geração de modelos 3D como uma alternativa ao LiDAR (Wallace et al., 2016; Thiel & Schmuilius, 2017).

Desenvolvida por Snavely et al. (2008), a técnica de SfM é relativamente recente e, embora os procedimentos de aquisição e processamento de imagens obtidas por RPA tenha se popularizado nos últimos anos no Brasil, trabalhos acadêmicos nacionais avaliando seu desempenho em ambiente agrícola ainda são incipientes na área florestal (Damian et al., 2016; Moriya et al., 2017; Souza et al., 2017). Neste contexto, este artigo tem como objetivo

avaliar o desempenho de imagens aéreas de baixa altitude, combinada com abordagens de fotogrametria e SfM, para estimativa da altura de um teste clonal de *Eucalyptus*.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda Areão em Piracicaba, São Paulo, Brasil, área pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Esse local é caracterizado pelo tipo climático Cwa do sistema de Köppen (Alvares et al., 2013a) e apresenta solo classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa (Vidal-Torrado et al., 2004).

As avaliações de altura foram efetuadas em um teste clonal de *Eucalyptus* da rede experimental do Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico Térmico e Biótico (TECHS-IPEF) (Binkley et al., 2017). O experimento, com 18 clones de *Eucalyptus*, foi implantado em novembro de 2013. Neste trabalho foram avaliados 15 clones, sendo cada clone alocado em uma parcela experimental de 20 árvores, com 5 linhas espaçadas a 2,3 m e 4 plantas por linha (também espaçadas a 2,3 m), totalizando 5,06 m² por planta. As parcelas receberam adubação de base e cobertura, bem como proteção fitossanitária para controle de pragas e doenças. As ervas daninhas também foram controladas durante todo o período de avaliação do experimento, de forma que o dossel das árvores era a única fonte de verde observada nas imagens aéreas.

Medidas de altura em campo (referência) e obtenção das imagens

As mensurações das alturas totais das árvores foram realizadas com clinômetro digital e trena aos 11, 16, 24 e 31 meses pós plantio, denominadas de coletas C1, C2, C3 e C4 respectivamente, seguindo a metodologia proposta por Machado & Figueiredo Filho (2006). Foram realizadas quatro coletas de imagens aéreas. As três primeiras (C1, C2 e C3) foram realizadas no mesmo dia do inventário florestal e, a quarta (C4), um mês após o inventário (Tabela 1).

Tabela 1. Detalhes das coletas de imagens aéreas.

| Coleta | Aeronave | Câmera | Nº de imagens | Altura | Data | Horário |
|--------|----------|--------------|---------------|--------|------------|---------|
| C1 | RPA1 | Canon T3i | 25 | 30 m | 15/10/2014 | 14:30 |
| C2 | RPA2 | GoPro Hero 3 | 34 | 60 m | 02/03/2015 | 15:00 |
| C3 | RPA2 | GoPro Hero 3 | 73 | 40 m | 27/11/2015 | 13:00 |
| C4 | RPA2 | GoPro Hero 3 | 56 | 60 m | 07/07/2016 | 14:00 |

Para as coletas foram utilizadas duas aeronaves diferentes, denominadas neste trabalho como RPA1 e RPA2. A RPA1 possuía um sistema propulsor composto por oito motores elétricos com capacidade máxima de carga 3,0 kg, tempo de voo de aproximadamente 15 minutos, sistema eletrônico para o controle do voo com receptor GNSS e piloto automático possibilitando efetuar rotas pré-definidas (Figura 1a). A câmera utilizada nesta aeronave foi uma Canon modelo T3i com resolução espectral na faixa do visível (350~700nm – RGB). Esta câmera apresenta um sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) com tamanho de 22,3 mm x 14,9 mm, gerando imagens de até 18 megapixels.

Semelhante a RPA1, a aeronave RPA2 possuía os mesmos sensores diferindo apenas o sistema propulsor composto por seis motores elétricos, capacidade máxima de carga 0,8 kg, e tempo de voo de aproximadamente 10 minutos (Figura 1b). Nesta aeronave foi embarcada uma câmera Hero 3 Black (GoPro, Califórnia, EUA), com resolução espectral na faixa do visível

(350~700 nm – RGB), um sensor CMOS de 6,17 mm x 4,55 mm, gerando imagens de até 12 megapixels.

Para o controle e comunicação das aeronaves durante a coleta de dados, foi utilizado uma estação de controle em duas frequências 433 MHz e 2,4 GHz. O software Mission Planner (ArduPilot Dev Team, EUA) foi utilizado para controle da aeronave e definição do plano de voo (Figura 1c). Os voos foram planejados para garantir recobrimento lateral e longitudinal de 90% entre as imagens. O plano de voo, assim como as informações referentes às linhas de voo, são apresentados na Figura 1d. O acompanhamento do voo em solo manteve contato visual com a aeronave durante toda a operação.

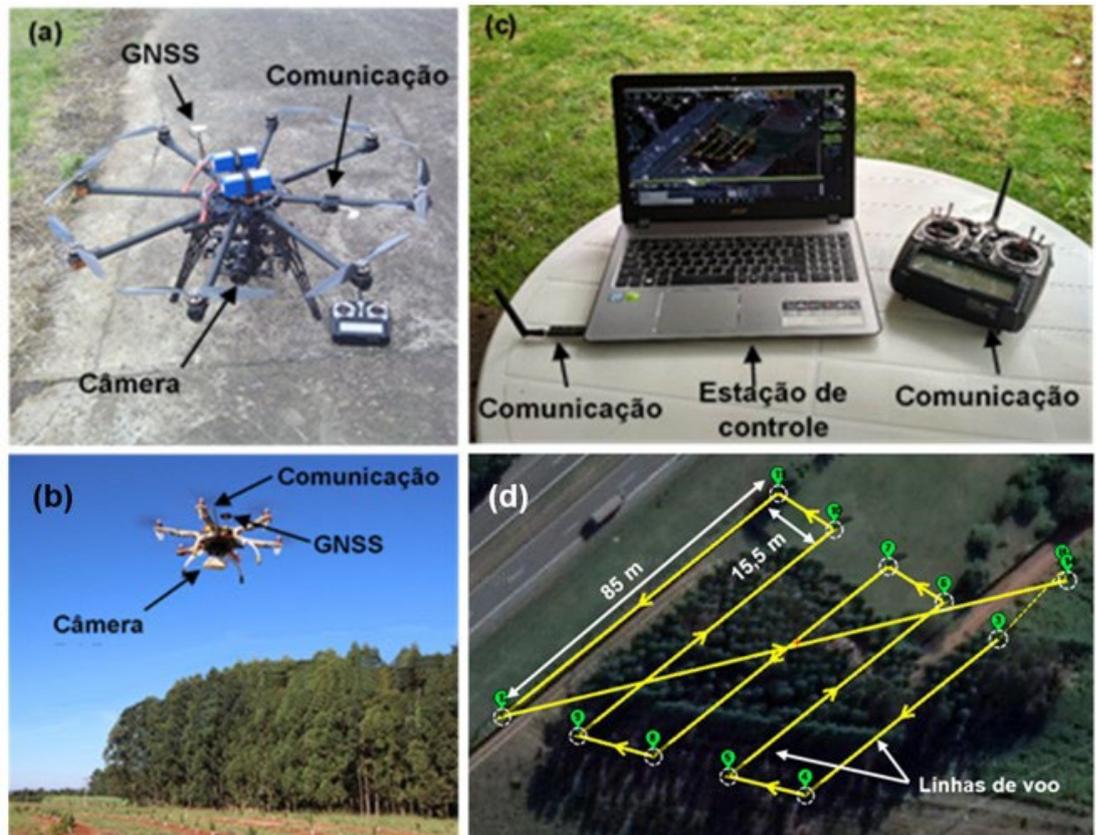


Figura 1. Equipamentos utilizados para a coleta das imagens aéreas. (a) Aeronave RPA1. (b) Aeronave RPA2. (c) Detalhes da estação de controle. (d) Plano de voo utilizado nas quatro coletas de imagens da área de estudo.

Processamento das imagens e estimativa da altura

Após a coleta das imagens foi realizado o georreferenciamento das mesmas no software Mission Planner (Oborne, 2013), nele foram sincronizadas as informações do registro de voo (coordenadas) e o horário de captura de cada imagem. Em seguida, foi utilizado a técnica SfM, por meio do software Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC, São Petersburgo, Rússia), para identificação de pontos homólogos nas diferentes imagens, gerando uma nuvem de pontos em três dimensões. A partir da nuvem de pontos foram realizados dois processos distintos: (i) interpolação dos pontos e geração do MDS; (ii) a classificação dos pontos com o objetivo de classificar pontos que retratassem o terreno para obtenção do MDT (Bendig et al., 2013). Na Figura 2, é apresentado o fluxograma com os resumos das etapas de processamento das imagens.

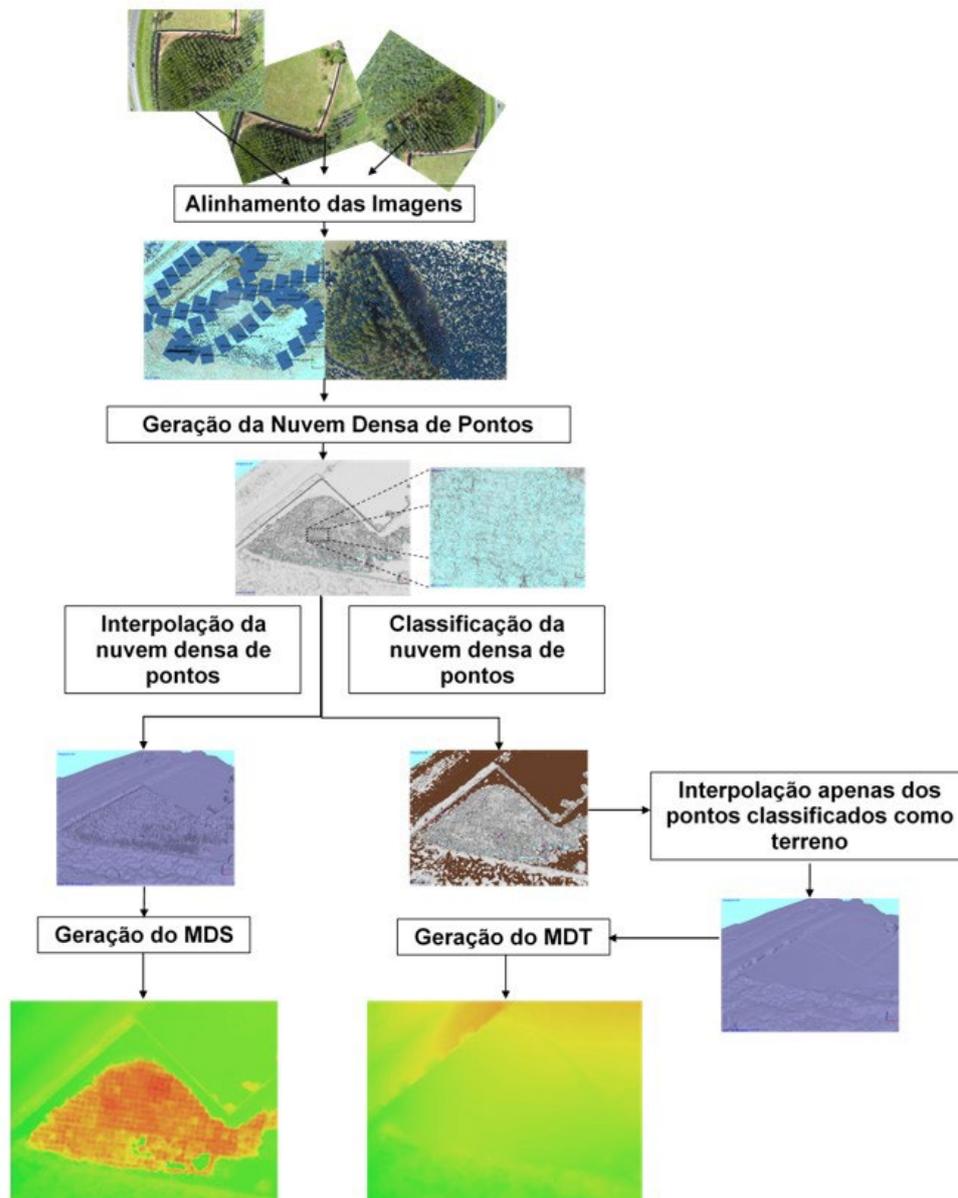


Figura 2. Fluxograma com o resumo das etapas de processamento das imagens para geração do MDT e MDS.

Na sequência, o MDT e o MDS foram exportados para o software QGIS (QGIS Development Team, 2019), sendo ambos utilizados para estimativa da altura, a qual foi calculada utilizando a Equação 1, conforme descrito por Hoffmeister et al. (2009).

$$Altura_n = MDS_n - MDT_n \tag{1}$$

Sendo: $Altura_n$ – Altura das árvores na coleta “n”; MDS_n – Modelo Digital da Superfície na coleta “n”; MDT_n – Modelo Digital do Terreno na coleta “n”.

Após gerar o arquivo raster com a altura das plantas, essa altura foi individualizada para cada planta fazendo uma média de uma área circular (raio de 0,5 m e área de 0,785 m²) alocada no ponto central de cada planta (Figura 3b). Este procedimento para a obtenção da altura de plantas foi realizado para todos os quatro levantamentos aéreos realizados neste trabalho.

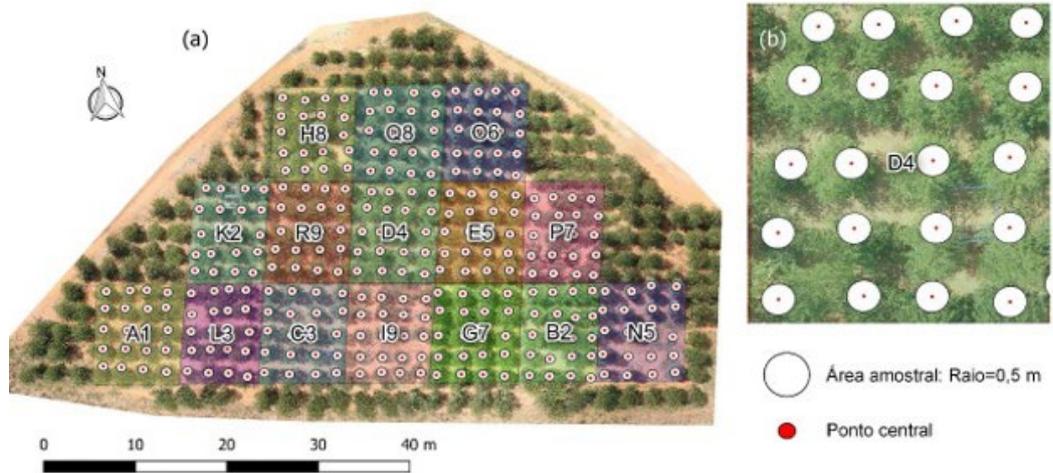


Figura 3. (a) Croqui esquemático da área de estudo, parcelas e pontos amostrais dos 15 clones avaliados (A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, I9, K2, L3, N5, O6, P7, Q8, R9) e a área amostral utilizada para a análise da nuvem de pontos. (b) Detalhe para os pontos centrais e as áreas circulares utilizadas para extrair a altura de cada planta.

Desempenho da estimativa da altura

As estimativas de altura pelas imagens aéreas, nos quatro levantamentos aéreos conduzidos em diferentes estágios de desenvolvimento do eucalipto, foram comparadas com os valores de altura de campo (medidas de referência). O desempenho foi avaliado por meio do erro médio quadrático (RMSE) (equação 2) e o coeficiente de determinação (R^2) (equação 3) das regressões lineares simples.

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ir} - X_{if})^2}{n}} \quad (2)$$

$$R^2 = cor(X_{ir} - X_{if})^2 \quad (3)$$

Sendo: n - número de observações; X_{ir} - alturas estimadas pelas imagens; X_{if} - alturas medidas em campo.

Visando obter uma métrica para avaliar a concordância entre as comparações foi calculado o índice de desempenho "Pi", que é o produto do coeficiente de correlação "r" e índice de concordância "d", combinando acurácia e precisão. A precisão é fornecida pelo coeficiente de correlação "r" que indica o grau de dispersão dos dados da média, ou seja, o erro aleatório. A acurácia está relacionada ao descompasso dos valores estimados daqueles observados, e a acurácia é estimada pelo índice de concordância "d". O critério de interpretação do Índice de Desempenho "Pi" é: $Pi \geq 0,75$, desempenho ótimo; $0,6 \leq Pi < 0,75$, desempenho muito bom; $0,45 \leq Pi < 0,6$, bom desempenho; $0,3 \leq Pi < 0,45$, desempenho tolerável; $0,15 \leq Pi < 0,3$, desempenho fraco; $0 \leq Pi < 0,15$, desempenho ruim; e $Pi < 0$, desempenho muito ruim, conforme metodologia proposta por Alvares et al. (2013b).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nuvem de Pontos

A Figura 4 apresenta as nuvens de pontos obtidas para as diferentes coletas (C1, C2, C3, C4). Nota-se que a técnica permitiu observar o incremento em altura dos indivíduos no

decorrer do tempo. No entanto, observa-se que pontos representando o terreno abaixo do dossel são inexistentes no MDS de C2, C3 e C4. Isso ocorreu em função do maior desenvolvimento das árvores que deixou os pontos de solo imperceptíveis para o algoritmo do SfM, não aparecendo na nuvem de pontos. Apenas a coleta C1 permitiu uma maior caracterização do solo pela técnica de SfM. Isso pode ser explicado pelo estágio inicial de desenvolvimento dos clones de eucalipto, que não proporciona o fechamento do dossel. Estes resultados corroboram com o observado por outros trabalhos que avaliaram a utilização de imagens aéreas para modelagem do terreno abaixo do dossel de plantas (Lisein et al., 2013; Puliti et al., 2015; Wallace et al., 2016). Esses pontos de solo são necessários para a geração do MDT, o qual é uma informação fundamental para cálculo da altura das plantas, tal como observado na Equação 1.

As informações altimétricas obtidas por câmeras RGB têm baixa penetrabilidade ao serem comparadas com os dados de LiDAR (Silva et al., 2015), o que torna o fechamento do dossel de plantas uma limitação para estimativa do MDT. Esta é uma limitação de sua utilização para a estimativa da altura de plantas com estágio de desenvolvimento avançado (Görgens et al., 2015), visto que o MDT é fundamental para o desenvolvimento da técnica. Por outro lado, essa limitação pode ser compensada com a utilização de MDTs gerados no início do desenvolvimento da cultura, ou gerados por outros métodos de levantamento altimétrico (e.g. receptores GNSS embarcados, estação total).

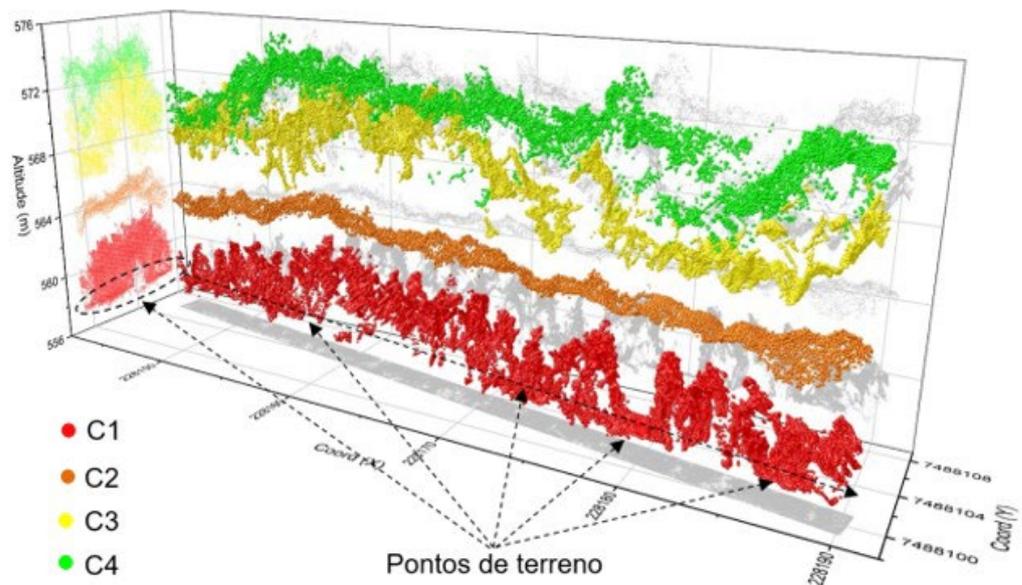


Figura 4. Distribuição tridimensional da nuvem densa de pontos para as quatro coletas.

Estimativa da altura

Os dados das regressões lineares entre altura estimada pelas imagens aéreas e a altura real de campo são apresentados nas Figuras 5, 6, 7 e 8. De modo geral, todas as regressões apresentaram R^2 superiores a 0,85, com exceção das parcelas P7 e N5 que apresentaram R^2 de 0,80 e 0,75, respectivamente. Os piores desempenhos de P7 e N5 podem estar relacionados à estrutura do dossel observada a campo para ambas as parcelas, a qual apresentaram menor homogeneidade devido a mortalidade de algumas árvores. Conforme ressaltado por Lisein et al. (2013) as áreas com dossel homogêneo apresentam maior precisão na estimativa da altura, ao contrário de regiões heterogêneas em que a modelagem possui limitação para descrever fielmente o dossel.

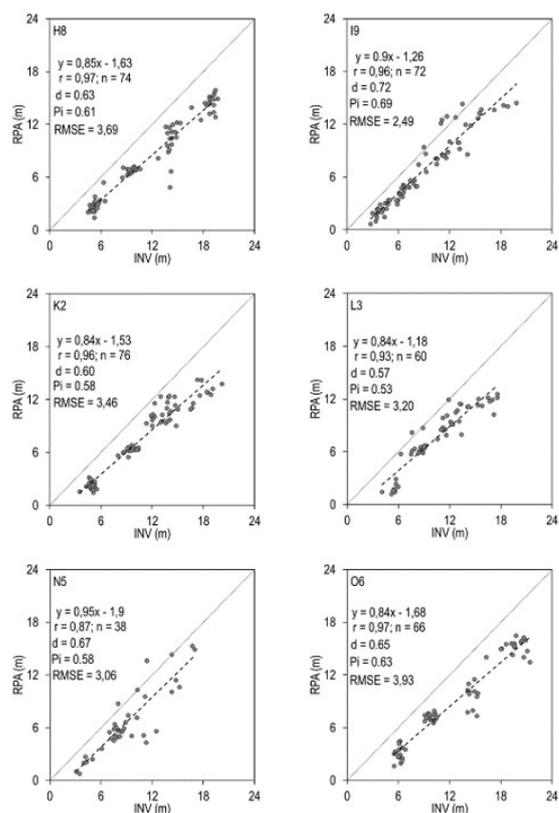


Figura 5. Dispersão entre a Altura de Campo (INV) e Altura Estimada pelas imagens aéreas (RPA), para as parcelas (A1, B2, C3, D4, E5 e G7) com as quatro coletas.

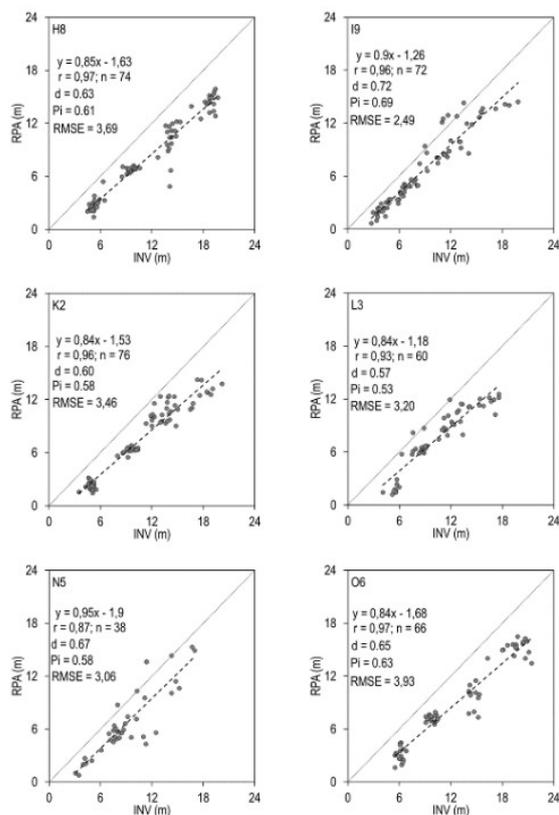


Figura 6. Dispersão entre a Altura de Campo (INV) e Altura Estimada pelas imagens aéreas (RPA), para as parcelas (H8, I9, K2, L3, N5 e O6) com as quatro coletas.

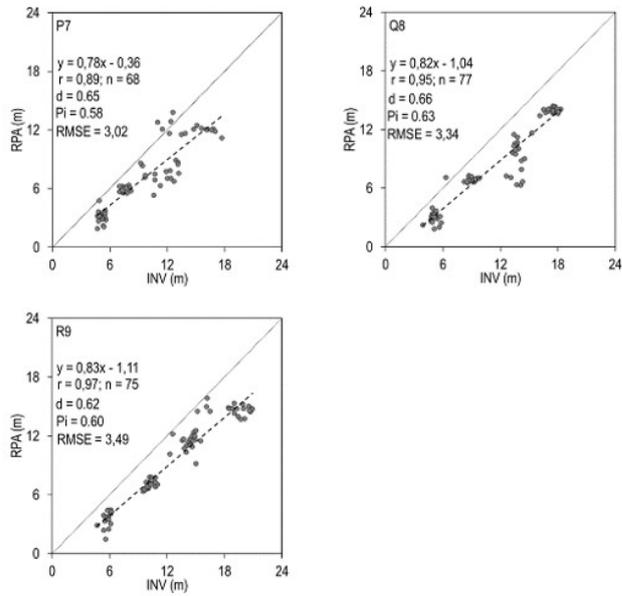


Figura 7. Dispersão entre a Altura de Campo (INV) e Altura Estimada pelas imagens aéreas (RPA), para as parcelas (P7, Q8 e R9) com as quatro coletas.

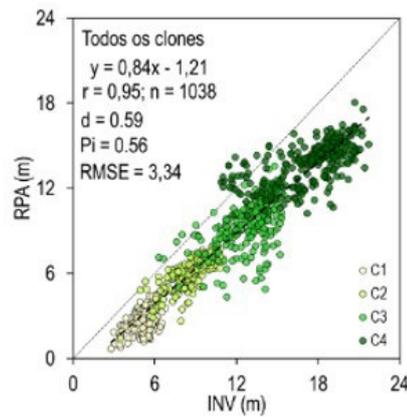


Figura 8. Dispersão entre a Altura de Campo (INV) e Altura Estimada pelas imagens aéreas (RPA), para cada todos os clones e as quatro coletas.

Os desempenhos de estimativa da altura observados no presente trabalho corroboram com pesquisas conduzidas em diferentes espécies florestais em diferentes países. Puliti et al. (2015), avaliando a técnica em uma floresta de pinus na Noruega encontraram R^2 de 0,71 e RSME de 13,3% para a altura. Wallace et al. (2016) também aplicou a técnica em uma floresta de eucalipto na Austrália e encontraram valores de R^2 de 0,68 e RSME de 1,3 m para a altura individual em comparação com dados de campo. Lisein et al. (2013) encontraram valores de R^2 de 0,91 e RSME de 4,7% para a altura individual de uma floresta nativa de clima temperado. Embora, as condições da floresta avaliada por estes autores sejam diferentes em relação a espaçamento de plantas e fechamento de dossel, estes autores observaram que apesar do LiDAR fornecer estimativas mais precisas da estrutura vertical das florestas ao longo da maior gama de densidades de dossel, o SfM apresentou resultados satisfatórios e pode ser considerado uma alternativa adequada de baixo custo para o levantamento de florestas.

A não padronização dos parâmetros relativos à câmera e planejamento de voo podem interferir no desempenho do algoritmo SfM em identificar de pontos homólogos, conseqüentemente, pode interferir em sua capacidade de estimar a altura das árvores. No presente trabalho, apesar do levantamento aéreo ter utilizado diferentes câmeras, alturas de voo e aeronaves, os resultados são consistentes quando comparados com estudos

semelhantes, os quais padronizaram as referidas variáveis. Assim, é possível inferir que o algoritmo SfM é flexível para variações destes parâmetros. No entanto, ressalta-se que este não foi o foco de análise do presente estudo e avaliações mais aprofundadas devem ser realizadas por trabalhos futuros.

Quando observamos os valores do índice de desempenho, foram obtidos valores acima de 0.53 para o índice Pi o que indica que os modelos apresentaram desempenho bom para as parcelas A1, C3, K2, L3, N5 e P7. Já nas parcelas B1, D4, E5, G7, H8, I9, O6, Q8 e R9 os valores foram superiores a 0,6 indicando desempenho muito bom de acordo com a escala proposta por Alvares et al. (2013b)

O mapeamento da altura neste trabalho permitiu observar a variabilidade espacial da área de estudo. A Figura 9 apresenta os mapas de altura e os mosaicos RGB, onde é possível observar que na coleta C1 algumas parcelas já se destacavam com relação à altura (R9, D4, E5 e Q8), essa variação entre parcelas ocorreu por se tratar de diferentes clones com características de crescimento distintas. A partir da coleta C2 é possível observar o fechamento do dossel, restando apenas algumas regiões abertas onde houve perdas de indivíduos (parcela N5).

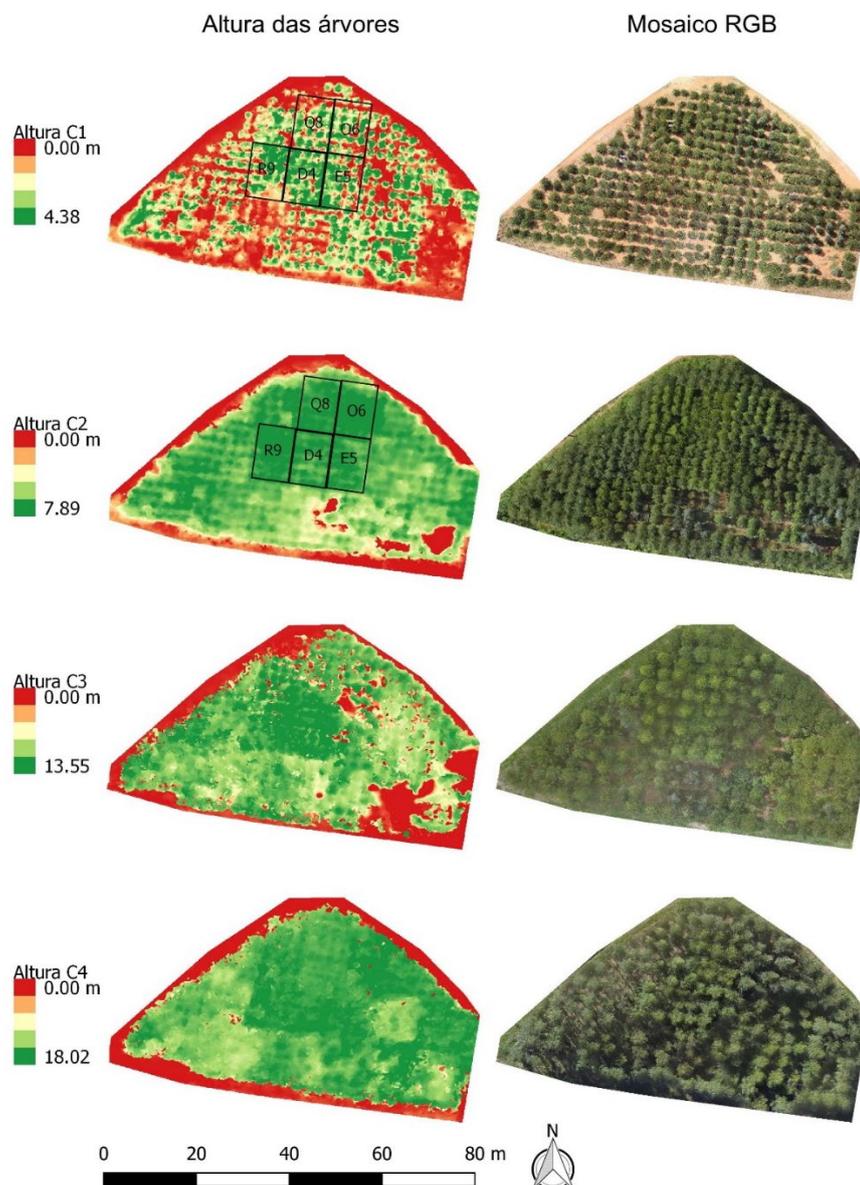


Figura 9. Variabilidade espacial e temporal da altura e ortomosaicos da área de estudo.

Os resultados observados demonstraram que além da utilização desta metodologia como um método alternativo para subsidiar inventários florestais, também é possível utilizá-la como ferramenta de monitoramento para o desenvolvimento de estratégias de manejo relacionadas à agricultura de precisão. Existem três métodos gerais para avaliar a variabilidade espacial de uma área produtiva: (i) medir o crescimento das plantas, (ii) medir as propriedades do solo e (iii) medir a produtividade (Hunt Junior & Daughtry, 2018). A predição da altura de árvores permite uma avaliação da variabilidade espacial e temporal do desenvolvimento de povoamentos florestais e pode ainda, fornecer informações adicionais que complementam os índices de biomassa ou vegetação espectral com o objetivo de prever o crescimento e a produtividade (Yin et al., 2011; Lisein et al., 2013; Boomsma et al., 2010).

CONCLUSÕES

A estimativa da altura de *Eucalyptus* Clonais por meio das imagens aéreas obtidas com aeronaves remotamente pilotadas (RPA) apresentou desempenhos bom e muito bom, com R^2 superiores a 0,75 e RSME inferiores a 3,94 m ao serem comparados com o método de referência (estimativas da altura em campo). A estimativa de altura de talhões florestais via levantamentos aéreos com RPA se mostrou uma alternativa acurada (RMSE = 3,94 m) para inferência deste atributo de maneira prática em áreas florestais, o que permitiria auxiliar na otimização operacional de inventários florestais, bem como avaliar a variabilidade espacial do desenvolvimento de plantas.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), ao Projeto TECHS pelo apoio nas atividades de campo e disponibilização de dados.

REFERÊNCIAS

- Alvares, A. C., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013a). Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Alvares, A. C., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., & Gonçalves, J. L. M. (2013b). Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(3-4), 407-427. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>.
- Bendig, J., Willkomm, M., Tilly, N., Gnyp, M. L., Bennertz, S., Qiang, C., Miao, Y., & Lenz-Wiedemann, V. I. S., & Bareth, G. (2013). Very high resolution crop surface models (CSMs) from UAV-based stereo images for rice growth monitoring in Northeast China. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(W2), 4-6. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-45-2013>.
- Binkley, D., Campoe, O. C., Alvares, C., Carneiro, R. L., Cegatta, Á., & Stape, J. L. (2017). The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 405, 271-283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>.
- Bolton, D. K., White, J. C., Wulder, M. A., Coops, N. C., Hermosilla, T., & Yuan, X. (2018). Updating stand-level forest inventories using airborne laser scanning and Landsat time series data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 66, 174-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.11.016>.
- Boomsma, C. R., Santini, J. B., West, T. D., Brewer, J. C., McIntyre, L. M., & Vyn, T. J. (2010). Maize grain yield responses to plant height variability resulting from crop rotation and tillage system in a long-term experiment. *Soil & Tillage Research*, 106(2), 227-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2009.12.006>.
- d'Oliveira, M. V. N., Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., & Andersen, H. (2012). Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 124, 479-491. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.014>.
- Damian, J. M., Pias, O. H. C., Santi, A. L., Di Virgilio, N., Berghetti, J., Barbanti, L., & Roberta Martelli, R. (2016). Delineating management zones for precision agriculture applications: a case study on wheat

- in sub-tropical Brazil. *Italian Journal of Agronomy*, 11(3), 171-179. <http://dx.doi.org/10.4081/ija.2016.713>.
- Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136, 259-276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005>.
- Görgens, E. B., Montagni, A., & Rodriguez, L. C. E. A. (2015). Performance comparison of machine learning methods to estimate the fast-growing forest plantation yield based on laser scanning metrics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 221-227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.07.004>.
- Hoffmeister, D., Bolten, A., Curdt, C., Waldhoff, G., & Bareth, G. (2009). High resolution Crop Surface Models (CSM) and Crop Volume Models (CVM) on field level by terrestrial laser scanning. In *Sixth International Symposium on Digital Earth: Models, Algorithms, and Virtual Reality*. <http://dx.doi.org/10.1117/12.872315>
- Hunt Junior, E. R., & Daughtry, C. S. (2018). What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 5345-5376. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>.
- Jakubowski, M. K., Guo, Q., & Kelly, M. (2013). Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 130, 245-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.024>.
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2013). A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*, 4(4), 922-944. <http://dx.doi.org/10.3390/f4040922>.
- Macedo, F. L., Sousa, A. M. de O., Gonçalves, A. C., Silva, H. R., & Rodrigues, R. A. F. (2017). Wood volume estimates for *Eucalyptus* sp. with satellite images of high spatial resolution. *Scientia Forestalis*, 45(114), 237-247.
- Machado, S. A., & Figueiredo Filho, A. (2006). *Dendrometria* (2ª ed., 316 p.). Guarapuava: Unicentro.
- Matasci, G., Herмосilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., Hobart, G. W., & Zald, H. S. J. (2018). Large-area mapping of Canadian boreal forest cover, height, biomass and other structural attributes using Landsat composites and lidar plots. *Remote Sensing of Environment*, 209, 90-106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.020>.
- Moriya, E. A. S., Imai, N. N., Tommaselli, A. M. G., & Miyoshi, G. T. (2017). Mapping mosaic virus in sugarcane based on hyperspectral images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2), 740-748. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2635482>.
- Næsset, E. (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 88-99. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00290-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00290-5).
- Osborne, M. (2013). *Mission planner*. Software. Recuperado em 3 de maio de 2019, de <http://ardupilot.org/planner/>
- Puliti, S., Ørka, H., Gobakken, T., & Næsset, E. (2015). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 7(8), 9632-9654. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70809632>.
- QGIS Development Team. (2019). *QGIS*. Software.
- Silva, A. G. P., Görgens, E. B., Campoe, O. C., Alvares, C. A., Stape, J. L., & Rodriguez, L. C. E. (2015). Assessing biomass based on canopy height profiles using airborne laser scanning data in eucalypt plantations. *Scientia Agrícola*, 72(6), 504-512. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0070>.
- Silva, C. A., Klauberg, C., Hudak, A. T., Vierling, L. A., Liesenberg, V., Carvalho, S. P. C., & Rodriguez, L. C. E. (2016). A principal component approach for predicting the stem volume in *Eucalyptus* plantations in Brazil using airborne LiDAR data. *Forestry*, 89(4), 422-433. <http://dx.doi.org/10.1093/forestry/cpw016>.
- Silva, C. A., Klauberg, C., Mendonça, B. A. F., Cahves e Carvalho, S. P. (2017). Effect of LiDAR density points on the prediction of height in *Pinus taeda* L. plantations. *Scientia Forestalis*, 45(115), 481-492.
- Snaveley, N., Seitz, S. N., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210. <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>.
- Souza, C. H. W., Lamparelli, R. A. C., Rocha, J. V., & Magalhães, P. S. G. (2017). Height estimation of sugarcane using an unmanned aerial system (UAS) based on structure from motion (SfM) point clouds. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2218-2230. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1285082>.

- Thiel, C., & Schmulius, C. (2017). Comparison of UAV photograph-based and airborne lidar-based point clouds over forest from a forestry application perspective. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2411-2426. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1225181>.
- Tomppo, E., Olsson, H., Stahl, G., Nilsson, M., Hagner, O., & Katila, M. (2008). Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 1982-1999. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.032>.
- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, 4(5), 1392-1410. <http://dx.doi.org/10.3390/rs4051392>.
- Vidal-Torrado, P., Faria, L. E. O., Sparovek, G., & Cooper, M. (2004). *Mapa pedológico detalhado 1:10.000 do Campus Luiz de Queiroz* (95 p.). Piracicaba: ESALQ-USP.
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovský, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of forest structure using two uav techniques: a comparison of airborne laser scanning and Structure from Motion (SfM) point clouds. *Forests*, 7(12), 62. <http://dx.doi.org/10.3390/f7030062>.
- Whitehead, K., & Hugenholz, C. H. (2014). Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2(3), 69-85. <http://dx.doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>.
- Wulder, M. A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, E., Ørka, H. O., Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C. W., & Gobakken, T. (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: a review. *Remote Sensing of Environment*, 121, 196-209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001>.
- Yin, X., McClure, M. A., Jaja, N., Tyler, D. D., & Hayes, R. M. (2011). In-season prediction of corn yield using plant height under major production systems. *Agronomy Journal*, 103(3), 923-929. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2010.0450>.

Contribuição dos autores: MM: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição; CAA: Conceituação, Administração do Projeto, Análise Formal, Metodologia, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição; TRT: Curadoria de Dados, Metodologia, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição; PRF: Curadoria de Dados, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição; OCC: Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição; RLC: Escrita – Revisão e Edição;