

## ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE LEVANTAMENTO AÉREO PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DE UMA PILHA DE MADEIRA

### ANALYSIS OF AERIAL SURVEY PARAMETERS FOR ESTIMATING THE VOLUME OF A WOOD PILE

Rayssa Stéfany Ramos Machado Cordeiro<sup>1</sup>, Carlos Alberto Araújo Júnior<sup>2</sup>, Christian Dias Cabacinha<sup>3</sup>, Matheus Antunes Fonseca<sup>4</sup>, Maria Rita Ferreira Nascimento<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, Minas Gerais, Brasil –  
rayssastefany00@gmail.com, carlosaraujo@ufmg.br, cabacinha@ufmg.br,  
matheus.fonseca1991@gmail.com, fnmariarita@gmail.com

#### RESUMO

No setor florestal, a gestão do estoque de madeira é crucial para a cadeia de abastecimento e logística. A fotogrametria com Aeronave Remotamente Pilotada (RPAs) surge como uma alternativa promissora para estimar o volume de madeira empilhada, embora persistam desafios relacionados à determinação dos parâmetros de voo ideais para o levantamento. Este estudo propõe uma análise preliminar com o objetivo de avaliar a configuração de voo mais apropriada para a estimativa do volume de uma pilha de madeira. O volume da pilha de madeira foi estimado por dois métodos: o método convencional com medição manual (M1) e por levantamento aéreo (M2), com cinco repetições para cada configuração de voo: M2a (80% e 90°); M2b (70% e 90°); M2c (80% e 70°); M2d (70% e 70°); M2e (80% e 50°); M2f (70% e 50°). As diferenças entre as estimativas de volume obtidas pelo método convencional e pelas diferentes configurações de voo foram analisadas utilizando o teste não paramétrico de postos sinalizados de Mann-Whitney, com significância de 5%. Os resultados indicaram que as medianas das estimativas volumétricas de madeira empilhada para o fator sobreposição não diferiram estatisticamente entre si dentro de cada um dos níveis de inclinação de câmera avaliados. Com base nos resultados obtidos, as configurações de voo mais adequadas para obtenção da estimativa do volume de madeira empilhada foram aquelas com inclinação de câmera de 90°, M2a e M2b.

**PALAVRAS-CHAVE:** Drone, Gestão do estoque, Imagem nadir, Imagem oblíqua.

#### ABSTRACT

In the forestry sector, wood stock management is crucial for supply chain and logistics. Photogrammetry with Remotely Piloted Aircraft (RPAs) emerges as a promising alternative for estimating wood volume, although challenges remain in determining the ideal flight parameters for surveying. This study proposes a preliminary analysis to evaluate the most suitable flight configuration for estimating the volume of a wood pile. Wood pile volume was estimated by two methods: the conventional method (M1) and aerial survey (M2), with five repetitions for each flight configuration: M2a (80% and 90°); M2b (70% and 90°); M2c (80% and 70°); M2d (70% and 70°); M2e (80% and 50°); M2f (70% and 50°). Differences between volume estimates obtained by the conventional method and different flight configurations were analyzed using the non-parametric Mann-Whitney signed-rank test, with a significance level of 5%. The results indicated that the medians of the volumetric estimates of stacked wood for the overlap factor did not differ statistically within each of the evaluated camera inclination levels. Based on the results obtained, the most suitable flight configurations for obtaining the estimate of stacked wood volume were those with a camera inclination of 90°, M2a and M2b.

**KEYWORDS:** Drone, Stock management, Nadir image, Oblique image.

## INTRODUÇÃO

A gestão eficiente do estoque de madeira, desempenha um papel fundamental no planejamento e no fluxo contínuo das operações de uma empresa, reduzindo a ocorrência de gastos desnecessários e interrupções na produção. No setor florestal, esta é uma tarefa de grande importância na cadeia de abastecimento interno e para fins de distribuição logística (PASZTORY et al., 2019; BERENDT et al., 2021; HERAKI et al., 2022; PURFÜRST et al., 2023), com demanda de inventários periódicos de pilhas de madeira para gestão do estoque (KARHA et al., 2019). Diferentes métodos têm sido empregados para estimar o volume das pilhas, tanto no campo quanto em pátios de estocagem (FIGUEIREDO et al., 2016; KARHA et al., 2019; HERAKI et al., 2022).

A medição manual é amplamente adotada em diversas partes do mundo (PASZTORY et al., 2019). O volume das pilhas é obtido a partir dos dados de largura, comprimento e a altura de cada pilha, resultando no volume ocupado pela madeira maciça e pelos espaços vazios entre as toras (PASZTORY et al., 2019; DIEZ et al., 2021). Tal volume é conhecido como volume em estéreo (SOARES et al., 2012). Dependendo do comprimento total da pilha e da uniformidade da altura do empilhamento, é recomendável dividir a pilha em seções de igual comprimento para medição da altura em diferentes pontos (SOARES et al., 2012; PASZTORY et al., 2019).

Apesar de sua praticidade, o método manual apresenta desafios operacionais à medida em que a quantidade de pilhas de madeira aumenta. O que tende a ocasionar um aumento na propensão de erros, no tempo de coleta e nos custos para obtenção dos dados (KARHA et al. 2019; PURFÜRST et al., 2023). Entre os problemas existentes, pilhas com alturas superiores a três metros tendem a ter menor precisão na medição desta dimensão (KARHA et al. 2019).

Uma alternativa ao método manual é o uso de técnicas de sensoriamento remoto para obtenção do volume de objetos na superfície terrestre, como demonstrado por Carvalho et al. (2021), Heraki et al. (2022) e Deliry & Avdan (2023). Nesse sentido, a fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), tem se destacado devido ao seu alto desempenho na reconstrução tridimensional de objetos e estruturas, conforme relato por Rangel et al. (2018), Nesbit & Hugenholtz (2019), Garcia & Oliveira (2021), Moreira et al. (2021), Dai et al. (2023), Deliry & Avdan (2023) e Turk et al (2024). A combinação de RPAs com fluxos de trabalho fotogramétricos por estrutura de movimento (SfM) e estereopsia multivista (MVS) tem sido

aplicada em diferentes contextos para análises volumétricas, incluindo inventário de pilha de madeira e carvão (MELO et al., 2019; CARVALHO et al., 2021; HERAKI et al., 2022), inventário florestal (MOREIRA et al., 2021), medição de pilhas de argila e rejeitos (SILVA et al., 2016; Esteves et al., 2020), modelagem de terreno (NESBIT & HUGENHOLTZ, 2019; DAI et al., 2023) e volumetria de edifício (VACCA et al., 2017; DELIRY & AVDAN, 2023).

Apesar dos avanços nas aplicações de RPAs para análises volumétricas, a relação entre as diversas combinações de parâmetros de projetos de voo para aquisição de imagens permanece complexa. Em particular, são raros os estudos que abordam a relação entre a taxa de sobreposição frontal e lateral e a inclinação de câmera na estimativa volumétrica, embora esses fatores sejam essenciais para a reconstrução tridimensional de objetos. Assim, acredita-se que diferentes configurações de voo influenciam significativamente a estimativa do volume de uma pilha de madeira.

Portanto, neste estudo será realizado uma análise preliminar com intuito de avaliar a configuração de voo mais adequada para a estimativa do volume de uma pilha de madeira, variando a taxa de sobreposição e a inclinação de câmera em relação ao eixo da aeronave. A pesquisa é necessária devido à falta de estudos de validação científica nesta área.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Local

O presente estudo foi realizado em uma pilha de madeira localizada no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, município de Montes Claros, Minas Gerais. O clima da região é do tipo Aw, conforme classificação de Köppen-Geiger, com temperatura média anual igual a 23,1°C e precipitação média anual de 869 mm. A altitude no local média é de 655,21 m.

Conforme registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a data de coleta dos dados, a temperatura média da manhã foi de 25,2°C, com umidade relativa do ar em 86%, baixa nebulosidade e ventos com velocidade de 0,5 m/s. De acordo com a escala modificada de Beaufort, os ventos descritos no período da manhã foram classificados como calmos ou quase calmos, não representando risco para a coleta de dados aéreos (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 2017; XING et al., 2023).

## Coleta de Dados

O volume da pilha de madeira roliça de *Eucalyptus* sp. foi obtido considerando dois métodos: convencional (M1) e por levantamento aéreo (M2). O primeiro consistiu na mensuração das dimensões da pilha com auxílio de trena, incluindo comprimento, largura e alturas ao longo da pilha. As alturas foram coletadas a cada intervalo de 50 cm. O segundo método considerou o imageamento aéreo com auxílio de uma aeronave remotamente pilotada. Neste caso, o equipamento utilizado foi o drone Mini 2 fabricado pela empresa DJI, equipado com Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) e câmera com sensor CMOS com resolução efetiva de 12 megapixels. Seis diferentes configurações de voo (tratamentos) foram avaliadas, variando-se o valor de sobreposição (frontal e lateral) das fotografias e inclinação da câmera em relação ao eixo da aeronave, sendo elas:

- M2a: sobreposição de 80% e inclinação de 90°;
- M2b: sobreposição de 70% e inclinação de 90°;
- M2c: sobreposição de 80% e inclinação de 70°;
- M2d: sobreposição de 70% e inclinação de 70°;
- M2e: sobreposição de 80% e inclinação de 50°;
- M2f: sobreposição de 70% e inclinação de 50°;

Os planos de voo foram elaborados utilizando o aplicativo Drone Harmony. A altura de voo foi fixada em 50 metros, com levantamento em grade dupla (linhas ortogonais). Nesta pesquisa a unidade experimental foi o sobrevoo, com cinco repetições para cada um dos tratamentos. As configurações consideradas no momento da elaboração do plano de voo foram definidas com base em testes anteriores e em resultados publicados na literatura (FIGUEIREDO et al., 2016; CARVALHO et al., 2021; MOREIRA et al., 2021; HERAKI et al., 2022). As imagens foram obtidas em formato JPG com 4000 x 2250 pixels de resolução horizontal e vertical.

## Processamento das Imagens

O processamento das imagens aéreas utilizou a abordagem fotogramétrica que combina as técnicas de estrutura de movimento (SfM) e estereopsia multivista (MVS) para reconstrução tridimensional a partir de múltiplas imagens. Como resultado, há a produção de ortoimagens e MDEs de alta resolução e baixo custo (ELTNER et al., 2015; RANGEL et al., 2018; JAMES et al., 2020; DAI et al., 2023). O processamento foi realizado com auxílio da versão de testes do software Agisoft Metashape Profissional instalado em um computador com sistema operacional Windows 10 Home de 64 bits, processador Intel Core i7 de 2,90 GHz, 16 GB de RAM e placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 1660 SUPER com 6 GB.

Um fluxo de trabalho organizado em cinco etapas foi estabelecido para o cálculo do volume da pilha de madeira, o qual foi reproduzido para todas as 30 repetições. Na etapa 1, as imagens foram importadas para o software e as configurações de referência espacial foram definidas. Alterou-se o sistema de referência de coordenadas geográficas para coordenadas planas UTM (Datum Sirgas 2000 zona 23S). A acurácia da câmera foi padronizada em 1 metro para todos os processamentos. A altitude do solo foi ajustada considerando a diferença entre a altitude registrada na imagem e altura de voo, definindo, assim, a cota de referência do solo.

A etapa 2, corresponde ao alinhamento das imagens a partir de pontos coincidentes entre diferentes fotografias. Dentre os parâmetros de alinhamento, padronizou-se a acurácia para altíssima, com aumento da escala da imagem em duas vezes de cada lado (fator igual a 4). Essa abordagem contribui para a obtenção de estimativas de posição da câmera mais precisas, pois o aumento da escala da foto de origem melhora a precisão da localização dos pontos de ligação em fotos adjacentes. Nessa etapa, foi considerado a pré-seleção genérica e de referência com intuito de reduzir o tempo de processamento, visto que as opções de pré-seleção otimizam o processo de correspondência entre as imagens. Além disso, foram ajustados parâmetros avançados, estabelecendo um limite de pontos chaves (40.000 unidades), correspondente ao limite superior de pontos característicos em cada imagem, e pontos de empate (10.000 unidades), equivalente ao limite superior de pontos correspondentes para cada imagem.

Na etapa 3, os parâmetros da câmera e a nuvem esparsa de pontos foram otimizados selecionando-se todos os parâmetros adicionais da câmera a serem otimizados. Em seguida, a nuvem densa de pontos foi gerada a partir da aplicação de algoritmos de correspondência de imagens MVS, o qual tem como base para cálculo a posição estimada da câmera e os dados de profundidade (DELIRY & AVDAN, 2023). A qualidade de reconstrução foi considerada como ultra elevada, que corresponde ao processamento das fotos em tamanho original, sem modificação da resolução da imagem. O parâmetro de filtragem de profundidade foi definido como agressivo, sendo utilizado algoritmos de filtragem para a redução de pontos com valores discrepantes (DELIRY & AVDAN, 2023).

O modelo digital de elevação para o local foi gerado na etapa 4 e o ortomosaico da área de estudos foi criado na etapa 5.

O volume em metro estéreo (st) da pilha de madeira foi

quantificado com uso da ferramenta de mensuração do próprio software. Para isso, foi necessário a delimitação de um polígono ao redor da pilha de madeira utilizando o ortomosaico. A superfície abaixo da pilha foi definida a partir da interpolação dos valores de altitudes próximos aos limites do polígono, os quais foram obtidos a partir dos dados do MDE, considerado o plano de melhor ajuste fornecido pelo software.

### Análise Estatística

Para cada repetição, calculou-se a diferença ( $d$ ) entre o volume da pilha obtido com as distintas configurações de voo (M2) e o volume calculado pelo método convencional (M1). Os valores de  $d$  foram analisados estatisticamente considerando o procedimento não paramétrico de postos sinalizados de Mann-Whitney, uma vez que o pressuposto de normalidade não foi alcançado conforme teste de Shapiro-Wilk a um nível de significância de 5%. Esse procedimento é recomendado para o contraste de médias que não atendem aos pressupostos dos testes paramétricos. Neste caso, a hipótese nula foi de que a mediana da diferença entre o volume estimado pelos diferentes métodos de aerolevantamento analisados é igual a zero.

A análise foi realizada com auxílio do Software R, com uso do pacote nativo de estatísticas do R (stats). O contraste entre as medianas das estimativas foi realizado com uso da função “wilcox.test” não considerando o argumento de amostras pareado como verdadeiro, a um nível de significância de 5%.

Os valores de  $d$  foram utilizados para criar em um gráfico do tipo boxplot para auxílio na compreensão dos resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área definida para realização dos sobrevoos, no momento do planejamento de voo, foi de aproximadamente 0,698 ha, contudo, a área imageada e o número total de fotos variou de acordo com os parâmetros de cada voo (nível de sobreposição e inclinação), variando entre 0,473 a 2,017 ha e de 10 a 37 fotos. A variação observada é esperada, garantindo a completa cobertura da área de estudo segundo os parâmetros de voo definidos.

A resolução espacial dos MDEs e ortomosaicos gerados variou para cada uma das configurações, com aumento do tamanho pixel à medida que a inclinação da câmera variou de 90° a 50° em relação a aeronave (Tabela 1). O tempo gasto na etapa de processamento variou entre 2 minutos e 40 segundos (M2b) e 14 minutos e 35 segundos (M2e).

**Tabela 1.** Número de pontos da nuvem densa, resolução espacial do modelo digital de elevação (cm/pixel), tempo de processamento (min). Os valores descritos representam a média das cinco repetições para cada uma das seis configurações de voo avaliadas.

Método	Nuvem Densa de Pontos	Resolução MDE (cm/pixel)	Tempo (min)
M2a	26.818.600	1,60	05:23
M2b	21.609.903	1,61	02:40
M2c	31.974.504	1,75	09:09
M2d	27.972.703	1,80	04:58
M2e	70.997.215	2,19	14:35
M2f	49.272.356	2,21	06:11

Onde: M2a = sobreposição de 80% e inclinação de 90°; M2b = sobreposição de 70% e inclinação de 90°; M2c = sobreposição de 80% e inclinação de 70°; M2d = sobreposição de 70% e inclinação de 70°; M2e = sobreposição de 80% e inclinação de 50°; M2f = sobreposição de 70% e inclinação de 50°.

O volume calculado da pilha de madeira utilizando o método convencional foi de 27,96 st. Em relação aos volumes obtidos com dados dos levantamentos aéreos, pode-se observar que houve uma tendência ao aumento e constância no volume de madeira estimado à medida em que há o aumento da inclinação da câmera (Tabela 2).

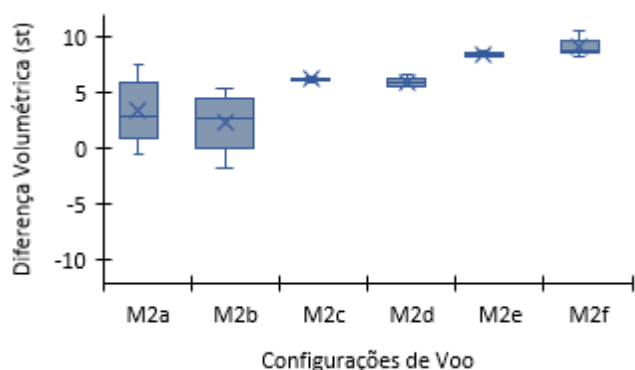
**Tabela 2.** Análise descritiva das estimativas volumétricas da pilha de madeira para cada configuração de voo avaliada, incluindo a mediana das estimativas volumétricas (st), volume mínimo estimado (st), volume máximo estimado (st) e intervalo interquartil das estimativas (st).

Método	Mediana do volume (st)	Volume Mínimo (st)	Volume Máximo (st)	Intervalo Interquartil (st)
M2a	30,92	27.51	35.50	4,99
M2b	30,71	26.34	33.45	4,59
M2c	34,21	34.01	34.44	0,29
M2d	33,90	33.62	34.57	0,75
M2e	36,43	36.24	36.71	0,30
M2f	36,86	36.30	38.51	1,19

Onde: M2a = sobreposição de 80% e inclinação de 90°; M2b = sobreposição de 70% e inclinação de 90°; M2c = sobreposição de 80% e inclinação de 70°; M2d = sobreposição de 70% e inclinação de 70°; M2e = sobreposição de 80% e inclinação de 50°; M2f = sobreposição de 70% e inclinação de 50°.

Os valores mais elevados para o intervalo interquartil foram observados para imageamento em

nadir (90°), indicando uma maior dispersão dos volumes estimados considerando as cinco repetições dentro da configuração de voo, conforme evidenciado no gráfico do tipo boxplot (Figura 1).



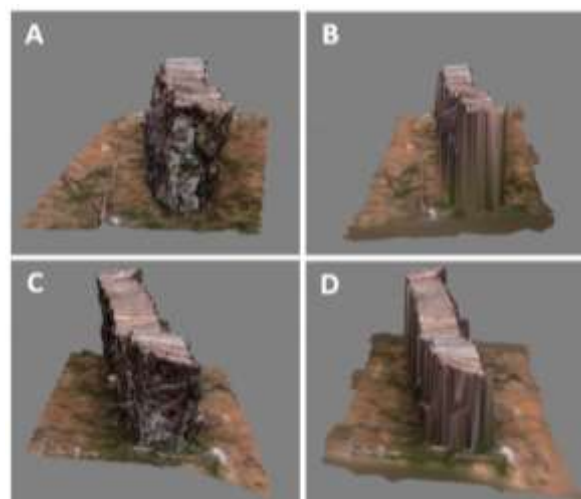
**Figura 1.** Dispersão da variação do volume estimado com aerolevantamento em relação ao volume estimado pelo método convencional.

A maior variação entre os volumes estimados para as repetições dentro das duas configurações de voo com inclinação de câmera de 90° pode ser explicada pela possível presença de distorções sistemáticas, o que é conhecido como erro de *doming* (DAI et al., 2023). O *doming* é resultante de erros associados à estimativa da distorção radial da lente, ocasionado por direções de visualizações quase que paralelas, padrão observado em voos com inclinação de câmera em 90°, na vertical (NESBIT & HUGENHOLTZ, 2019; JAMES et al., 2020).

Essa fonte de variação pode ser mitigada com aumento da rede de imagens convergentes e com a utilização de câmera inclinada, proporcionando melhoria da calibração da câmera e em consequência redução do erro sistemático (JAMES et al., 2020; DAI et al., 2023). A redução da variação entre as estimativas de madeira empilhada (Figura 1), nas cinco repetições, dentro das configurações de voo com inclinação de câmera de 70° e 50°, pode ser explicada com base no aumento dos ângulos de intersecção dos pontos de ligação, potencializado o ajuste do feixe e a calibração da câmera com atenuação dos erros (DAI et al., 2023).

Por sua vez, entre as explicações possíveis para as superestimativas do volume observado está a geometria do objeto de estudo. A pilha de madeira analisada não estava perfeitamente organizada, apresentando toras em desarranjo com o empilhamento principal e ocasionando a distorção da pilha de madeira (VACCA et al., 2017; DELIRY & AVDAN, 2023). Ao obter a estimativa volumétrica de um objeto vertical com elementos salientes a partir do MDE, há uma tendência a superestimativas, devido à natureza

2,5D (falso 3D) do modelo. O MDE é uma superfície raster gerada a partir da interpolação dos pontos da nuvem, o que em estruturas geometricamente complexas pode ocasionar distorções e generalizações (DELIRY & AVDAN, 2023). Deste modo, as madeiras que estão fora do arranjo principal da pilha, conforme visualizado na nuvem de pontos (Figura 2-A-C) foram interpretadas verticalmente como parte sólida da pilha de cima para baixo, ocasionando o rebatimento destas peças (Figura 2-B-D). Esse comportamento também foi constatado por Deliry & Avdan em 2023, ao superestimarem o volume de um edifício com beiral saliente. É importante ressaltar que as superestimativas são mais acentuadas nos métodos de levantamento aéreo com câmera inclinada. Isso pode ocorrer devido ao ângulo de visada, o qual permite obter maior detalhamento do perfil da pilha de madeira.

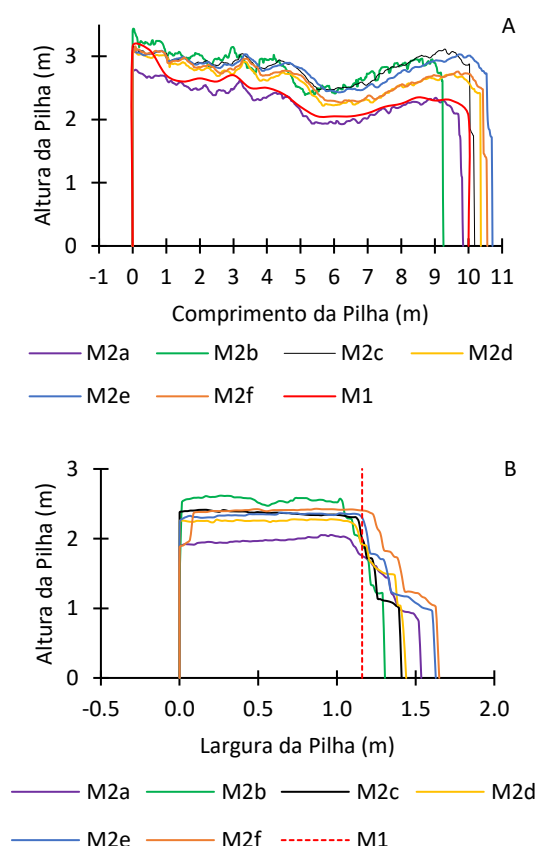


**Figura 2.** Visão da estrutura da pilha de madeira. (A) Nuvem densa de pontos, orientação 1; (B) Modelo 3D gerado a partir da superfície 2,5D (MDE), orientação 1; (C) Nuvem densa de pontos, orientação 2; (D) Modelo 3D gerado a partir da superfície 2,5D (MDE), orientação 2.

Outra possível explicação para o comportamento observado está associada à presença do erro de posicionamento das imagens. A precisão posicional das imagens desempenha papel crucial para a realização adequada das análises subsequentes, e essa precisão é dependente da plataforma utilizada (TOMASTIK et al., 2017; RANGEL et al., 2018). No caso deste estudo, a precisão do sistema de navegação do drone utilizado não assegura precisão posicional centimétrica, sendo essa uma possível fonte de variação aos volumes estimados da pilha de madeira (JAMES et al., 2020; DAI et al., 2023), com ênfase para o imageamento considerando os ângulos de câmera fora de 90°. No imageamento aéreo vertical, considerando o ângulo de 90°, a forma da projeção

terrestre do pixel é retangular, sem variações no tamanho ao longo da imagem. Por outro lado, as imagens aéreas oblíquas apresentam variações do pixel ao longo de sua estrutura, com projeção trapezoidal do solo, variando a escala de cada pixel dentro de uma mesma imagem. Esse aspecto aumenta a complexidade da cena ocasionando a intensificação de erros de posicionamento (XIE et al., 2016; LÓPEZ et al., 2020; MASET & FUSIELLO, 2024).

Dentro do fluxo de trabalho do SfM a etapa de alinhamento é essencial, garantindo a posição e orientação estimada da câmera em relação a cada uma das imagens, gerando ao final a nuvem de pontos georreferenciada (DELIRY & AVDAN, 2023). Dessa maneira, a presença de erros de posicionamento pode explicar as deformidades geométricas observadas na pilha (Figura 3), com aumento da ocorrência de erros planimétricos e altimétricos, devido aos efeitos negativos presentes na distribuição dos pontos da nuvem densa e consequentemente na geração do MDE e ortomosaico (RANGEL et al., 2018; SAMMARTANO et al., 2020). O fato descrito foi observado para todas as configurações de voo analisadas, com deformação mais acentuada nas pilhas obtidas segundo método de imageamento com câmera inclinada (70° e 50°)



**Figura 3.** Perfil da pilha de madeira para cada configuração de voo e segundo o método convencional. (A) Visão

longitudinal da pilha de madeira; (B) Visão transversal da pilha de madeira.

Os dados analisados não satisfizeram os pressupostos de homoscedasticidade e normalidade para análises paramétricas, com valor-p inferior ao nível de significância estabelecido de 5%. Os resultados do teste de postos sinalizados de Mann-Whitney indicaram que as medianas das estimativas volumétricas de madeira empilhada para o fator sobreposição lateral e frontal, não diferiram estatisticamente entre si dentro de cada um dos níveis de inclinação de câmera avaliado. Isso sugere que a escolha da taxa de sobreposição, seja 80% ou 70%, não influencia significativamente no volume estimado da pilha de madeira para as inclinações de câmera avaliadas (Tabela 3).

**Tabela 3.** Valor-p para o teste de postos sinalizados de Mann-Whitney entre as diferenças de estimativas do volume da pilha obtido segundo método convencional e por aerolevantamento, para as configurações de voo analisadas.

Método	M2a	M2b	M2c	M2d	M2e
M2a					
M2b	0,6905				
M2c	0,1508	0,0079			
M2d	0,1508	0,0079	0,3095		
M2e	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	
M2f	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0952

Onde: M2a = sobreposição de 80% e inclinação de 90°; M2b = sobreposição de 70% e inclinação de 90°; M2c = sobreposição de 80% e inclinação de 70°; M2d = sobreposição de 70% e inclinação de 70°; M2e = sobreposição de 80% e inclinação de 50°; M2f = sobreposição de 70% e inclinação de 50°.

Com base nos resultados deste experimento, o parâmetro de voo que apresentou menor variação na estimativa do volume de madeira, em comparação com o método convencional, foi o método M2b que é estatisticamente semelhante ao método M2a. Diante do exposto, o imageamento com inclinação de câmera em nadir (90°) mostrou-se mais viável do que o imageamento com câmera inclinada, independentemente da taxa de sobreposição escolhida, 80% ou 70%, segundo as condições deste experimento.

A aplicação recente de imageamento oblíquo, baseado em uso de aeronave remotamente pilotada (RPA), tem crescido nos últimos anos, abrangendo diversas áreas, como o inventário de pilha de madeira e carvão (CARVALHO et al., 2021; HERAKI et al., 2022), inventário

florestal (MOREIRA et al., 2021), perda de solo em encostas de estradas florestais (TURK et al., 2024), topografia de pedreiras (ROSSI et al., 2017), modelagem de terreno (NESBIT & HUGENHOLTZ, 2019; DAI et al., 2023), alterações geomórficas (JAMES et al., 2020) e volumetria de edifício (VACCA et al., 2017; DELIRY & AVDAN, 2023). Entretanto, como observado neste experimento, o imageamento oblíquo em geometrias mais complexas pode levar a maiores erros de estimativas (MOREIRA et al., 2021). Os sobrevoos realizados na área com câmera inclinada (70° e 50°) resultaram em um maior número de pontos na pilha, considerando os mesmos parâmetros de processamento, o que contribui para um maior detalhamento da sua estrutura e aumento da complexidade da cena.

Ao obter o volume da pilha de madeira segundo MDE (2,5D), o efeito de rebatimento pelas toras salientes pode ter sido uma das fontes potenciais de variação entre o volume estimado pelo método convencional (M1) e por levantamento aéreo (M2), com tendência a superestimativa do volume madeira (VACCA et al., 2017; DELIRY & AVDAN, 2023). Associado a isso, a maior complexidade das imagens em perspectiva pode contribuir para o aumento dos efeitos negativos na distribuição dos pontos da nuvem densa e na geração do MDE e Ortomosaico (XIE et al., 2016; JAMES et al., 2020; LÓPEZ et al., 2020; SAMMARTANO et al., 2020; DAI et al., 2023; MASET & FUSIELLO, 2024), conforme discutido anteriormente.

Neste contexto, a utilização de pontos de controle pode ser uma alternativa eficaz para mitigar as deformações longitudinais e transversais sofridas pela pilha de madeira, reduzindo a ocorrência de erros nas estimativas de volume. Esses pontos possuem coordenadas conhecidas no terreno e precisão posicional centimétrica, auxiliando na calibração das imagens e no seu referenciamento espacial, o que reduz a ocorrência de erros de posicionamento nas imagens adquiridas por aerolevantamento. Isso contribui para o alinhamento adequado das imagens e, consequentemente, para a reconstrução tridimensional dos objetos na superfície.

Este estudo realiza uma análise preliminar da influência do plano de voo na estimativa do volume de uma pilha de madeira, proporcionando avanços na discussão sobre a utilização de RPAs no manejo florestal. No entanto, são necessárias avaliações futuras quanto à eficiência dos planos de voo selecionados neste estudo em condições de campo, especialmente com um maior número de pilhas. É fundamental compreender a utilização de RPAs para estimativa volumétrica de madeira empilhada quando há presença de variações no tamanho das pilhas, nas alturas

de empilhamento, na declividade do terreno, bem como a inclusão de pontos de controle.

## CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que a configuração de voo adotada para o aerolevantamento exerce influência significativa na estimativa do volume de uma pilha de madeira. Entre as configurações de voo avaliadas, aquelas com inclinação de câmera de 90°, apresentando taxa de sobreposição frontal e lateral de 80% (M2a) e 70% (M2b), mostraram-se mais adequadas para obtenção da estimativa do volume de uma pilha de madeira. Além disso, não foi observada diferença significativa entre os percentuais de sobreposição frontal e lateral avaliados para estimativa volumétrica da pilha de madeira dentro de cada inclinação de câmera, neste experimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Drones e a Meteorologia**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/assuntos-relacionados/drones-e-a-meteorologia#:~:text=Acima%20dessa%20velocidade%2C%20o%20n%C3%ADvel,acima%20de%2036%20km%2Fh>.
- BERENDT, F. et al. Reliability of photo-optical measurements of log stack gross volume. **Silva Fennica**. v.55, p.1-13, 2021. <https://doi.org/10.14214/sf.10555>
- CARVALHO, L.M.E. et al. Charcoal heaps volume estimation based on unmanned aerial vehicles. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**. v.83, 303-309, 2021. <https://doi.org/10.2989/20702620.2021.1997067>
- Dai, W. et al. Improving UAV-SfM photogrammetry for modelling high-relief terrain: Image collection strategies and ground control quantity. **Earth Surface Processes and Landforms**. v.48, p.2884–2899, 2023. <https://doi.org/10.1002/esp.5665>
- DELIRY, S.I. AVDAN, U. Accuracy evaluation of UAS photogrammetry and structure from motion in 3D modeling and volumetric calculations. **Journal of Applied Remote Sensing**. v. 17, p. 1-21, 2023. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.024515>
- DIEZ, M.F. et al. 3D-Simulation of Wood Stacks to Analyze the Influence of Log Properties on Stack Volume. **Environmental Sciences Proceedings**. v.3, p.1-6, 2021. <https://doi.org/10.3390/IECF2020-08063>.

ELTNER, A. et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. **Earth Surface Processes and Landforms**. v.40, p.741–755, 2015. <https://doi.org/10.1002/esp.3673>

ESTEVEZ, V.M. et al. Comparativo entre cálculo de volumes realizados a partir de levantamento com Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), em diferentes alturas de voo. **Revista Paramétrica**. v. 12, p. 818-832, 2020.

FIGUEIREDO, E. O. et al. **Estimativa do volume de madeira em pátios de estocagem de toras por meio de câmeras rgb instaladas em aeronaves remotamente pilotadas (ARP)**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa Acre, v.1, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1066063/estimativa-do-volume-de-madeira-em-patios-de-estocagem-de-toras-por-meio-de-cameras-rgb-instaladas-em-aeronaves-remotamente-pilotadas-arp>.

GARCIA, M.V.Y.; OLIVEIRA, H.C. The influence of flight configuration, camera calibration, and ground control points for digital terrain model and orthomosaic Generation using unmanned aerial vehicles imagery. **Bulletin of Geodetic Sciences**. v.27, p.1-18, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000200015>

HERAKI, L. et al. The use of captured images by remotely piloted aircraft (RPA) in measuring the stacked log volume in a stockyard. **Revista Floresta**. v.52, p. 394-401, 2022. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v52i2.83003>

JAMES, M.R. et al. Mitigating systematic error in topographic models for geomorphic change detection: accuracy, precision and considerations beyond off-nadir imagery. **Earth Surface Processes and Landforms**. v.45, p.2251-2271, 2020. <https://doi.org/10.1002/esp.4878>

KARHA, K. et al. Estimating the accuracy and time consumption of a mobile machine vision application in measuring timber stacks. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 158, p. 167-182, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.040>

LÓPEZ, J.M.G. et al. Mission Flight Planning of RPAS for Photogrammetric Studies in Complex Scenes. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v. 9, p. 1-22, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060392>

MASETE, E.; FUSIELLO, A. Scales of oblique photographs updated. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 207, p.198-202, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.12.003>

MELO, A.M. et al. Uso de veículos aéreo não tripulado no monitoramento de pátios de carvão. **XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 2018- 2021, 2019.

MOREIRA, B.M. et al. Assessment of the Influence of Survey Design and Processing Choices on the Accuracy of Tree Diameter at Breast Height (DBH) Measurements Using UAV-Based Photogrammetry. **Drones**. v.5, p.1-20, 2021. <https://doi.org/10.3390/drones5020043>

NESBIT, P.R.; HUGENHOLTZ, C.H. Enhancing UAV–SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique

Images. **Remote Sensing**. v.11, p.1-24, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11030239>

PASZTORY, Z. et al. Comparison of different stack measuring methods. **Sibirskij Lesnoj Zhurnal**. v. 3, p. 5-13, 2019. DOI: 10.15372/SJFS20190301

PURFÜRST, T. et al. Comparison of wood stack volume determination between manual, photo-optical, iPad-LiDAR and handheld LiDAR based measurement methods. **IForest**. v.16, p.243-252, 2023. <https://doi.org/10.3832/ifor4153-016>

RANGEL, J.M.G. et al. The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. **International Journal of Remote Sensing**. v.39, p.7154-7171, 2018. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1515508>

ROSSI, P. et al. Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: methodology and feasibility analysis. **European Journal of Remote Sensing**. v.50, p.211-221, 2017. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1313097>

SAMMARTANO, G. et al. Oblique images and direct photogrammetry with a fixed wing platform: first test and results in hierapolis of phrygia (TK). **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIV ISPRS Congress**. p. 75-82, 2020. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-75-2020>

SILVA, C.A. et al. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. **Bol. Ciênc. Geod.** v. 22, p. 73-94, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100005>

SOARES, C.P.B.; NETO, F.P.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2012.

TOMASTIK, J. et al. Accuracy of Photogrammetric UAV-Based Point Clouds under Conditions of Partially-Open Forest Canopy. **Forest**. v.8, p.1-16, 2017. <https://doi.org/10.3390/f8050151>

TURK, Y. et al. Capabilities of using UAV and close range photogrammetry to determine short-term soil losses in forest road cut slopes in semi-arid mountainous areas. **Environmental Monitoring and Assessment**. v.196, p.1-18, 2024. DOI: 10.1007/s10661-024-12339-1

VACCA, G. et al. The use of nadir and oblique UAV images for Building knowledge. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v.6, p.2-26, 2017. <https://doi.org/10.3390/ijgi6120393>

XIE, L. et al. An asymmetric re-weighting method for the precision combined bundle adjustment of aerial oblique images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 117, p. 92-107, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.017>

XING, Z. et al. Active Wind Rejection Control for a Quadrotor UAV Against Unknown Winds. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**. v.59, p.8956-8968, 2023. DOI: 10.1109/TAES.2023.3315254