

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Agrárias
Mestrado Acadêmico em Ciências Florestais

Rayssa Stéfany Ramos Machado Cordeiro

**ESTIMATIVA DO VOLUME DE PILHAS DE MADEIRA UTILIZANDO DADOS DE
AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA DE BAIXO CUSTO**

Montes Claros
2024

Rayssa Stéfany Ramos Machado Cordeiro

**ESTIMATIVA DO VOLUME DE PILHAS DE MADEIRA UTILIZANDO DADOS DE
AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA DE BAIXO CUSTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Ciências Florestais.

Orientador: Carlos Alberto Araújo Júnior

Coorientador: Christian Dias Cabacinha

Montes Claros
2024

Cordeiro, Rayssa Stéfany Ramos Machado.

C794e
2024

Estimativa do volume de pilhas de madeira utilizando dados de aeronave remotamente pilotada de baixo custo[manuscrito]/ Rayssa Stéfany Ramos Machado Cordeiro. Montes Claros, 2024.

62 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Carlos Alberto Araújo Júnior

Banca examinadora: Carlos Alberto Araújo Júnior, Gilciano Saraiva Nogueira, Stanley Schettino.

Inclui referências: f. 20-22; 37-41; 57-62.

1. Manejo Florestal -- Teses. 2. Sensoriamento remoto -- Teses. 3. Voo -- Controle -- Teses. 4. Processamento de imagens -- Teses. I. Araújo Júnior, Carlos Alberto . II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 630:528.8

ELABORADA PELA BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA DO ICA/UFMG
Nádia Cristina Oliveira Pires / CRB-6/2781

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 06 dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 8:00 horas, sob a Presidência do Professor Carlos Alberto Araújo Júnior, D. Sc. (Orientador—UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Gilciano Saraiva Nogueira, D. Sc. (UFV) e Stanley Schettino, D. Sc. (UFMG/ICA), reuniu-se, presencialmente, a Banca de Defesa de Dissertação de Raissa Stefany Ramos Machado Cordeiro, aluna do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação da referida aluna, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: "Estimativa do volume de pilhas de madeira utilizando dados de aeronave remotamente pilotada de baixo custo", sendo a aluna considerada aprovada. E, para constar, eu, Professor Carlos Alberto Araújo Júnior, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 06 de dezembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
GILCIANO SARAIVA NOGUEIRA
Doutor em Ciências Florestais
Instituto de Ciências Florestais/UFMG

Gilciano Saraiva Nogueira
Membro

Documento assinado digitalmente
STANLEY SCHEITINO
Doutor em Ciências Florestais
Instituto de Ciências Florestais/UFMG

Stanley Schettino
Membro

Documento assinado digitalmente
CARLOS ALBERTO ARAÚJO JÚNIOR
Doutor em Ciências Florestais
Instituto de Ciências Florestais/UFMG

Carlos Alberto Araújo Júnior
Orientador

Dedico este trabalho a Deus e minha família!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me possibilitar chegar até aqui com saúde, determinação e coragem para superar os obstáculos ao longo do caminho. Agradeço aos meus familiares e amigos pelo apoio e incentivo, em especial a minha mãe, Walkiria, que esteve presente em cada momento, tanto nos felizes quanto nos desafiadores com muito amor, carinho e perseverança. Ao meu pai, Lourival, expresso gratidão por sua presença em minha trajetória, com palavras de força e otimismo.

Ao meu marido, Diego Cordeiro, agradeço por estar sempre ao meu lado, sendo meu incentivo diário para enfrentar cada novo desafio, com gestos e palavras de amor, confiança e afirmação.

Agradeço, também, aos meus professores por todos os ensinamentos, especialmente ao meu orientador, professor Carlos Alberto Araújo Júnior, que sempre incentivou minha busca por novos conhecimentos, e ao meu coorientador, professor Christian Dias Cabacinha, pelo apoio durante a realização desta pesquisa. Sou grata a todos aos integrantes do Laboratório de Pesquisa Operacional e Modelagem Florestal da Universidade Federal de Minas Gerais, que contribuíram com palavras e gestos de apoio. Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

RESUMO

Os conceitos inovação e controle são frequentemente aplicados nos processos produtivos atuais, incluindo no setor florestal. A gestão eficiente do estoque de madeira é uma tarefa importante nas empresas florestais, garantindo o fluxo contínuo e logística adequada das operações que ligam a silvicultura a indústria. A quantificação do volume empilhado de madeira é fundamental para essa gestão, demandando a coleta de informações em campo, como o comprimento das toras, comprimento da pilha de madeira e a altura da pilha. Em várias regiões do mundo, a medição manual dessas dimensões ainda é comum, o que torna o processo trabalhoso e demorando, dificultando o controle constante do estoque. Contudo, o uso de aerolevantamentos na área de manejo florestal tem crescido, impulsionado pelos avanços técnicos envolvendo aeronaves remotamente pilotadas (ARP), ou RPA na sigla em inglês (*Remotely-Piloted Aircraft*), e o desenvolvimento de algoritmos para processamento baseados na estrutura de movimento (SfM) e estereopsia multivista (MVS). No entanto, ainda há necessidade de avaliar as variáveis que influenciam a estimativa do volume de madeira empilhada com aerolevantamento, como o próprio plano de voo, o que representa uma lacuna operacional que merece destaque nas investigações para aplicações florestais. Portanto, o presente trabalho tem por objetivo estimar o volume de madeira empilhada em campo utilizando dados de sensoriamento remoto coletados por um drone de baixo custo. Para isso, foi realizada uma análise preliminar afim de identificar a configuração de voo mais apropriada para a estimativa do volume de uma pilha de madeira, variando a taxa de sobreposição e inclinação de câmera em relação ao eixo da aeronave. Com base nos resultados dessa análise e na literatura existente, uma nova avaliação foi conduzida em condições de campo para verificar se diferentes planos de voo gerariam estimativas precisas para o volume de pilhas de madeira. Ambos os testes foram realizados com uso de equipamento de baixo custo e sem a utilização de pontos de controle. Os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram que o aerolevantamento com drone de baixo custo e sem o uso de pontos de controle é capaz de fornecer estimativas volumétricas precisas de madeira empilhada, contribuindo para os avanços na aplicação de drones no setor florestal, com destaque para o manejo florestal.

Palavras-chave: aeronaves remotamente pilotadas (ARP); manejo florestal; plano de voo; nuvens de pontos baseadas em imagens.

ABSTRACT

The concepts of Innovation and Control are frequently applied in current production processes, including the forestry sector. Efficient wood stock management is an important task for forestry companies, ensuring a continuous flow and appropriate logistics for operations that connect forestry to industry. The quantification of stacked wood volume is essential for this management, requiring the collection of field data, such as log length, pile length, and pile height. In several regions of the world, manual measurement of these dimensions remains common, making the process labor-intensive and time-consuming, which complicates consistent stock control. However, the use of aerial surveys in forestry management has grown, driven by technical advances in remotely piloted aircraft (RPA) and the development of processing algorithms based on structure from motion (SfM) and multiview stereopsis (MVS). Nevertheless, there is still a need to evaluate the variables that influence stacked wood volume estimates with aerial surveys, including the flight plan itself, which represents an operational gap that warrants attention in forestry applications research. Thus, the present study aims to estimate the volume of stacked wood in the field using remote sensing data collected by a low-cost drone. For this purpose, a preliminary analysis was conducted to identify the most appropriate flight configuration for estimating the volume of a wood stack, varying the overlap rate and camera angle relative to the aircraft's axis. Based on the results of this analysis and existing literature, a new field evaluation was conducted to verify whether different flight plans would yield accurate estimates of wood pile volumes. Both tests were performed using low-cost equipment and without the use of control points. The results obtained in this study showed that aerial surveys with low-cost drones and without the use of control points are capable of providing accurate volumetric estimates of stacked wood, contributing to advancements in drone applications within the forestry sector, particularly in forest management.

Keywords: Remotely Piloted Aircraft (RPA); forest management; flight plan; image-based point clouds.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de uma pilha de madeira.....	15
Figura 2 - Dispersão da variação do volume estimado com aerolevante em relação ao volume estimado pelo método convencional.....	30
Figura 3 - 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.....	31
Figura 4 - 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.....	33
Figura 5 - Disposição das pilhas de madeira no campo. As letras indicam a posição das pilhas em relação aos talhões de plantio: A indica pilha interna e B indica pilha externa.....	44
Figura 6 - Dispersão do erro de estimativa em função do volume das pilhas de madeira, do comprimento da pilha e da altura média das pilhas.....	51
Figura 7 - Estimativa de volume total das pilhas de madeira para os métodos convencional (VP_{ma}) e para os três diferentes métodos de aerolevante (VP_{20} , VP_{50} e VP_{80}).....	52

LISTA DE TABELAS

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.....	29
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 interquartilico das estimativas (st).....	29
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 aerolevanteamento, para as configurações de voo analisadas.....	34
Tabela 4: Descrição dos dados das 24 pilhas de madeiras amostradas para estimativa de volume da pilha (st).....	49
Tabela 5: Análise descritiva das estimativas de volume das pilhas de madeira para os métodos convencional (VP_{ma}) e para os três diferentes métodos de aerolevanteamento (VP_{20} , VP_{50} e VP_{80}).....	52
Tabela 6: Resultados do teste não paramétrico de postos sinalizados de Wilcoxon.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ARP	- Aeronave Remotamente Pilotada
Bits	- <i>Binary Digit</i>
CMOS	- <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
GB	- Gigabyte
GNSS	- Sistema Global de Navegação por Satélite
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
LiDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDT	- Modelo Digital de Terreno
RAM	- <i>Random-Access Memory</i>
RGB	- <i>Red-Green-Blue</i>
RTK	- <i>Real-time kinematic</i>
TLS	- <i>Transport Layer Security</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1	Medição do volume de madeira empilhada	14
2.1.1	Método Convencional – Medição do volume de madeira empilhada pelo método manual	16
2.1.2	Método Alternativo – Medição do volume de madeira empilhada de maneira automática.....	16
2.2	Uso de Drone na volumetria	18
2.2.1	Uso de Drone para medição de volume de pilha de argila e rejeitos na mineração	18
2.2.2	Uso de Drone para medição do volume de pilhas de carvão e madeira empilhada.....	19
2.3	Referências.....	20
3	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE LEVANTAMENTO AÉREO PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DE UMA PILHA DE MADEIRA.....	23
3.1	Introdução.....	23
3.2	Material e métodos	25
3.2.1	Local.....	25
3.2.2	Coleta de Dados.....	25
3.2.3	Processamento das Imagens	26
3.2.4	Análise Estatística	27
3.3	Resultados e discussão.....	28
3.4	Conclusões.....	36
3.5	Referências	37
4	ESTIMATIVA DO VOLUME DE PILHAS DE MADEIRA EM CAMPO UTILIZANDO DRONE DE BAIXO CUSTO	42
4.1	Introdução.....	42

4.2	Material e métodos	44
4.2.1	Descrição dos Dados	44
4.2.2	Medição convencional	45
4.2.3	Levantamento aéreo.....	45
4.2.4	Processamento das imagens	46
4.2.5	Análise dos resultados	48
4.3	Resultados.....	49
4.4	Discussão	53
4.5	Conclusão.....	56
4.6	Referências	57

1 INTRODUÇÃO

A estimativa do volume de madeira empilhada é um procedimento de grande relevância nas empresas do setor florestal, sendo fundamental para a gestão e monitoramento do estoque disponível para consumo. A capacidade de dimensionar corretamente o volume de madeira, tanto em campo quanto nos pátios das unidades produtivas, é fator essencial ao planejamento de operações como transporte de madeira, reduzindo a ocorrência de gastos desnecessários e interrupções na produção (Soares *et al.*, 2003; Bertola, 2003; Karha *et al.*, 2019).

O volume estéreo (st) é unidade ainda comum, na prática, para o controle do estoque de madeira e serviços, o qual corresponde ao volume de madeira de uma pilha calculado pela multiplicação de suas dimensões. De acordo com a definição do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), o volume estéreo é o volume de uma pilha de madeira roliça, considerando volume sólido de madeira (m^3) e a inclusão dos espaços vazios entre as toras. Desta forma, um metro estéreo corresponde a quantidade de madeira presente em uma pilha de dimensões 1,0m x 1,0m x 1,0m. A variação nos espaços vazios está relacionada as variações na área seccional das toras, bem como à sua curvatura e forma (Soares *et al.*, 2012).

A obtenção do volume de madeira empilhada em unidade estéreo (st) requer coleta de informações em campo, incluindo comprimento das toras, comprimento da pilha de madeira e a altura da pilha. No caso da existência de variações na altura da pilha, é necessário realizar a medição desta em diferentes pontos (Soares *et al.*, 2012). A coleta dessas informações ocorre de maneira manual, sendo este um processo trabalhoso e demorado, o que dificulta o controle constante do estoque. Contudo, profissionais da área de mensuração e empresas florestais têm buscado métodos e abordagens alternativas para otimizar a quantificação do volume de madeira empilhada.

Nesse contexto, a fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) surge como alternativa promissora para a estimativa volumétrica de madeira empilhada, fornecendo informações de formas, feições e dimensões do objeto em estudo (Figueiredo *et al.*, 2016; Heraki *et al.*, 2022). Estimativas volumétricas para pilhas de madeiras em pátio industrial obtidas segundo imageamento realizado com drone, não apresentaram diferenças significativas em relação ao método convencional

de medição manual, para alturas de voo de 60m, 80m e 100m (Heraki *et al.*, 2022). No entanto, não há um consenso em relação aos parâmetros que resultam em estimativas mais precisas para o volume de madeira empilhada em campo.

Deste modo, o presente estudo tem como objetivo estimar o volume de madeira empilhada em campo utilizando dados de sensoriamento remoto coletados por um drone de baixo custo. Para isso, foi realizada uma análise preliminar de seis diferentes planos de voo para a estimativa do volume de uma pilha de madeira. Além disso, foi avaliado se diferentes planos de voo podem gerar estimativas precisas para o volume de pilhas de madeira posicionadas em campo

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Medição do volume de madeira empilhada

No processo produtivo atual, os conceitos de inovação e controle são frequentemente utilizados, estando presentes também no setor florestal como um todo. Para além dos avanços metodológicos e tecnológicos que visam melhorias contínuas em equipamentos e processos, as empresas florestais reconhecem a importância do controle da matéria prima como fator de alta relevância na estabilidade e aumento do desempenho produtivo (Gonçalves *et al.*, 2016).

Além dos investimentos efetuados em setores como o melhoramento genético florestal, é de suma importância a realização do controle rigoroso da matéria-prima, madeira, nos módulos da cadeia produtiva florestal, incluindo a colheita, transporte e armazenamento (Gonçalves *et al.*, 2016). Dessa forma, a gestão do estoque de madeira em campo compõe um dos fatores essenciais ao controle dos processos, o qual utiliza os dados do volume de madeira empilhada. É fundamental que as informações obtidas em campo sejam confiáveis, contribuindo assim para a eficiência da gestão da matéria-prima.

O volume de madeira empilhada é muito utilizado pelas empresas de celulose e carvão, correspondendo ao volume estéreo obtido pela multiplicação das dimensões da pilha (Scolforo *et al.*, 2008; Soares *et al.*, 2012). Conforme definição estabelecida pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), o volume estéreo é definido como volume de uma pilha de madeira roliça (Figura 1), considerando o volume sólido de madeira (m³) e a inclusão dos espaços vazios normais existentes entre as toras (Soares *et al.*, 2012).

Nessa situação, o volume de madeira empilhada, em estéreo (st), pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$V = x \cdot y \cdot z$$

Em que:

V = Volume de madeira empilhada, em st;

x = Comprimento das toras, em m;

y = Comprimento da pilha de madeira, em m;

z = Altura da pilha de madeira, em metros (m).

Quando há diferença na largura da pilha de madeira, ocasionada pela variação do

comprimento das toras, a medida deve ser tomada em diferentes pontos e será considerado o comprimento médio das toras. O volume em estéreo da pilha de madeira, deverá ser obtido pela expressão:

$$V = \bar{x} \cdot y \cdot z$$

Em que:

V = Volume de madeira empilhada, em st;

\bar{x} = Comprimento médio das toras, em m;

y = Comprimento da pilha de madeira, em m;

z = Altura da pilha de madeira, em metros (m).

Quando há diferença na altura da pilha de madeira, a medida deve ser tomada em diferentes pontos e será considerado a altura média da pilha. O volume em estéreo da pilha de madeira, será obtido pela expressão:

$$V = \bar{x} \cdot y \cdot \bar{z}$$

Em que:

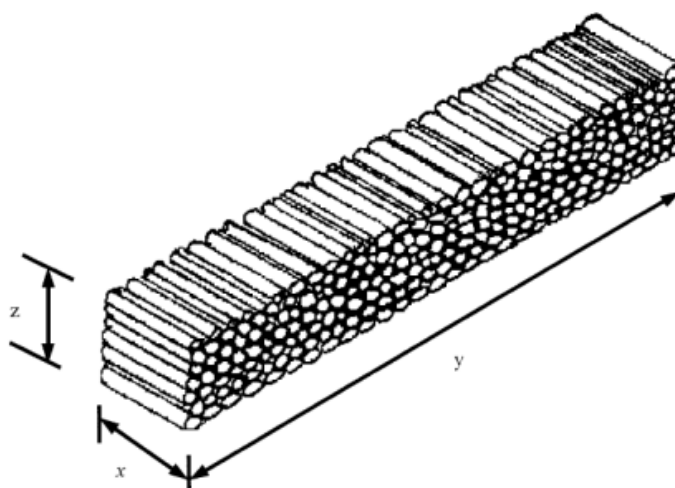
V = Volume de madeira empilhada, em st;

\bar{x} = Comprimento médio das toras, em m;

y = Comprimento da pilha de madeira, em m;

\bar{z} = Altura média da pilha de madeira, em metros (m).

Figura 1 – Representação de uma pilha de madeira



Fonte: Bertola, 2002.

2.1.1 Método Convencional – Medição do volume de madeira empilhada pelo método manual

O método de medição manual do volume de madeira empilhada (st) consiste no caminhamento em campo e medição de todas as pilhas de madeira localizadas na bordadura do talhão. Para cada pilha, são coletadas informações de altura, largura (comprimento da tora) e comprimento da pilha (Karha *et al.*, 2019). Os pontos de medição da altura devem ser distribuídos uniformemente ao longo da pilha de madeira (Moskalik *et al.*, 2022).

A medição da pilha de madeira pode ser realizada utilizando-se instrumentos como fita métrica, trena e gabarito. É de suma importância garantir que os equipamentos estejam devidamente calibrados. Com auxílio dos equipamentos, são medidas as dimensões da pilha, isto é, sua altura, largura e comprimento.

2.1.2 Método Alternativo – Medição do volume de madeira empilhada de maneira automática

O planejamento e gerenciamento dos recursos florestais demandam informações coletadas em campo, abrangendo dados relacionados à colheita de madeira, estoque e operações florestais. Atualmente, a obtenção de atributos dendrométricos de fácil mensuração, como diâmetro à altura do peito e altura das árvores, ocorrem por meio de ferramentas simples, tais como paquímetros, clinômetros (Liang *et al.*, 2016; Saarinen *et al.*, 2017) fitas e sutas. No entanto, novas tecnologias têm proporcionado uma mudança na perspectiva de obtenção de informações florestais, com destaque para o setor de inventário.

O escaneamento a laser terrestre (TLS), também conhecido como LiDAR (*Light Detection and Ranging*), utiliza pulsos de laser que apresentam desvio luminoso ao entrar em contato com um objeto. Assim, a medição de um objeto em relação à posição do scanner é possível através do tempo que o pulso do laser leva para atingir o alvo e retornar (Watt & Donoghue, 2005; Giongo *et al.*, 2010; Liang *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2016; Martí *et al.*, 2021). Essa tecnologia tem se mostrado eficaz na obtenção de informações florestais, dentre elas na medição do volume de madeira empilhada, uma

vez que o método fornece uma representação 3D do alvo (Martí *et al.*, 2021). Contudo, a utilização do escaneamento a laser terrestre ainda não se consolidou como ferramenta operacional em inventários florestais, devido o custo relativamente elevado do instrumento, software limitado e à falta de profissionais capacitados para coleta dos dados (Liang *et al.*, 2016).

A utilização de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) tem demonstrado avanço exponencial em seu uso no setor florestal, especialmente na última década (Eugenio *et al.*, 2020; Heraki *et al.*, 2022). A utilização dessas tecnologias tem ganhado espaço no inventário florestal, possibilitando a estimativa de parâmetros dendrométricos e sendo uma ferramenta importante na gestão moderna do inventário (Eugenio *et al.*, 2020). As ARPs podem ser utilizadas para obtenção de variáveis diversas, como altura, diâmetro de copa, volume e crescimento.

O estudo da produção florestal, utilizando imagens espaciais de alta resolução obtidas pelo sobrevoo com ARPs, apresenta-se como opção viável para empresas e profissionais da área. Essa ferramenta representa uma alternativa para a mensuração do volume de madeira empilhada (Figueiredo *et al.*, 2016; Locks *et al.*, 2017; Heraki *et al.*, 2022), oferecendo uma possibilidade de menor custo e manuseio mais simples quando comparada a outras alternativas geotecnológicas disponíveis, como o LiDAR de solo.

Dessa forma, a estimativa do volume de madeira empilhada obtida por meio da fotogrametria digital aérea utilizando aeronave remotamente pilotada (ARPs) evidencia resultados satisfatórios para toras de madeira empilhadas em pátio industrial (Figueiredo *et al.*, 2016; Locks *et al.*, 2017; Heraki *et al.*, 2022). Contudo, é evidenciado que a altura de voo está relacionada à precisão das estimativas, com erros tendendo a serem mais significativos à medida que a altura de voo aumenta.

Avaliações de diferentes alturas de sobrevoo, 60 m, 80 m e 100 m, para estimar o volume de madeira empilhada em pátios industriais, em comparação ao método de medição manual, não revelou diferenças significativas (Locks *et al.*, 2017; Heraki *et al.*, 2022). Associado à altura de voo, a obtenção de boas estimativas do volume de madeira empilhada requer uma intensidade adequada de pontos-chave e coincidentes entre as imagens sucessivas, contribuindo para a construção de uma nuvem de pontos consistente com a realidade (Kung *et al.*, 2011; Figueiredo *et al.*, 2016).

2.2 Uso de Drone na volumetria

2.2.1 Uso de Drone para medição de volume de pilha de argila e rejeitos na mineração

O dinâmico desenvolvimento tecnológico tem contribuído para transformações significativas no estudo das feições topográficas e na avaliação do espaço físico, com crescimento considerável das tecnologias de sensoriamento remoto. Uma ferramenta que vem apresentando destaque neste contexto é a ARP (Aeronave Remotamente Pilotada), pois possibilitam o mapeamento de extensas áreas com bom custo-benefício. Isso ocorre devido à capacidade de realizar tais atividades com equipe reduzida e menor tempo (Silva *et al.*, 2016; Esteves *et al.*, 2020).

No setor da mineração, a determinação e monitoramento dos volumes obtidos nos processos são de suma importância, desde o dimensionamento de corpos mineralizados até a quantificação dos produtos gerados, incluindo rejeitos (Esteves *et al.*, 2020). A quantificação do volume de uma pilha de material presente na superfície é possível por meio da nuvem de pontos gerada após o processamento das imagens obtidas no sobrevoo com drone. As Nuvens de pontos fornecem um sistema tridimensional de coordenadas definidas pelos eixos X, Y e Z, com dados de latitude, longitude e altitude, os quais são atribuídos à superfície externa da pilha, permitindo assim a medição e quantificação do volume.

Estudos demonstram a viabilidade da utilização de ARPs na quantificação do volume de pilhas de argila e de rejeitos na mineração (Silva *et al.*, 2016; Esteves *et al.*, 2020). Ao avaliar diferentes alturas de voo, 60 m, 90 m e 120 m, para quantificação volumétrica de uma pilha de argila teve que a diferença de volume entre as medições foi irrelevante, e todas as três alturas apresentaram bom desempenho, com uma variação média de 0,50% (Esteves *et al.*, 2020). Contudo, objetivando a otimização do processo, tanto em campo quanto em escritório, a altura de 120 m foi mais atrativa, pois resultou em redução no número de fotos, tempo de sobrevoo e tempo de processamento.

Ao avaliar três metodologias diferentes para obtenção do volume de uma pilha de rejeitos de mineração, levantamento com ARP, GNSS e LiDAR terrestre, constatou-se que as ARPs apresentaram melhor desempenho. Esse resultado foi atribuído principalmente à perspectiva aérea e *nadir* do levantamento, que possibilitou gerar uma nuvem de pontos bem distribuída em toda área, em especial entre pequenos

amontoados de materiais no topo da pilha (Silva *et al.*, 2016).

2.2.2 *Uso de Drone para medição do volume de pilhas de carvão e madeira empilhada*

No setor florestal, são diversas as áreas de estudo que utilizam ARPs em seus processos, incluindo o monitoramento e inventário florestal. É demonstrado o seu potencial na previsão do volume de estoque em crescimento florestal, sem a necessidade do Modelo Digital do Terreno (MDT) (Giannetti *et al.*, 2018). Além disso, as ARPs possibilitam a estimativa de parâmetros dendrométricos (Eugenio *et al.*, 2020) e podem ser aplicadas para gestão do estoque de madeira e seus subprodutos, como é o caso do carvão.

A estimativa volumétrica baseada em estereoscopia digital tem se destacado no setor florestal, inclusive na gestão do estoque de carvão, que tradicionalmente é realizado pelo GNSS-RTK, sendo um processo trabalhoso. A utilização de ARPs na estimativa volumétrica de pilhas de carvão demonstrou bons resultados, mesmo sem a aplicação de pontos de controle, com erros inferiores a 10% (Melo *et al.*, 2019). Dessa forma, a aplicação de ARPs representa uma alternativa de baixo custo na gestão do estoque de carvão, possibilitando um aumento na frequência de coleta dos dados.

As ARPs também representam uma alternativa para a mensuração do volume de madeira empilhada, fornecendo informações sobre formas, feições e dimensões do objeto. Estudos demonstram que a estimativa do volume de madeira empilhada em pátios industriais, utilizando fotogrametria digital aérea por meio de ARPs apresentam resultados satisfatórios (Figueiredo *et al.*, 2016; Locks *et al.*, 2017; Heraki *et al.*, 2022). A utilização da fotogrametria digital aérea por meio de ARPs apresenta uma opção de menor custo e de manuseio mais simples em comparação com outras alternativas geotecnológicas disponíveis, como o LiDAR de solo (*Light Detection and Ranging*).

2.3 Referências

BEIGUELMAN, B. **Curso Prático de Bioestatística**. 5. ed. Ribeirão Preto, SP: FUNPEC, 2002.

BERTOLA, A.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, J. C.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. Determinação de Fatores de Empilhamento Através do Software DIGITORA. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v.27, n.6, p.837-844, 2003.

CHIRYSHEV, Y. V.; KRUGLOV, A. V.; ATAMANOVA, A. S. Automatic detection of round timber in digital images using random decision forests algorithm. **International Conference on Control and Computer Vision**. New York, NY, USA: ACM, p. 39–44, 2018.

ESTEVES, V. M.; FERNANDES, H. E.; NETO, O. J. S.; SILVA, R. P.; PARZZANINI, P. D. Comparativo entre cálculo de volumes realizados a partir de levantamento com Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), em diferentes alturas de voo. **Revista Paramétrica**. v. 12, n. 13, p. 818-832, 2020.

EUGENIO, F. C.; SCHONS, C. T.; MALLMANN, C. L.; SCHUH, M. S.; FERNANDES, P.; BADIN, T. L. Remotely piloted aircraft systems and forests: a global state of the art and future challenges. **Canadian Journal of Forest Research**. Ottawa, v. 50, n. 8, p. 705-716, mai.2020.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N.; LOCKS, C. J.; PAPA, D. A. Estimativa do volume de madeira em pátios de estocagem de toras por meio de câmeras rgb instaladas em aeronaves remotamente pilotada (ARP). **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Rio Branco, Embrapa Acre, dez.2016.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p.231-244, out.2010.

GONÇALVES, A. F.; CAVALCANTE, E. M. D.; PIMENTA, L. R.; MATTIAZZO, F. B., SEGURA, T. E. S. A gestão sistêmica do transporte e estocagem de madeira como fator diferencial na produtividade e qualidade da celulose. **Revista O Papel**. v. 77, n. 10, p. 76-87, oct.2016.

HERAKI, L.; LOPES, E. S.; FILHO, P. C. O. The use of captured images by remotely piloted aircraft (RPA) in measuring the stacked log volume in a stockyard. **Revista Floresta**. Curitiba-PR. v.52, n.2, p. 394-401, jun.2022.

KÜNG, O.; STRECHA, C.; BEYELER, A.; ZUFFEREY, J. C.; FLOREANO, D.; FUA, P.; GERVAIX, F. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. **International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**. v.38-1/C22, p. 125-130, ago.2011.

LIANG, X.; KANKARE, V.; HYYPPA, J.; WANG, Y.; KUKKO, A.; HAGGRÉN, H.; YU, X.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; GUAN, F.; HOLOPAINEN, M.; VASTARANTA, M. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **Elsevier**. v. 115, p. 63-77, maio.2016.

LOCKS, C. J.; FERREIRA, M. E.; JÚNIOR, L. R. A.; CHAVES, J. H. Estimating wood volume in sawmill yards of Brazilian Amazon by Remotely Piloted Aircraft Systems. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. Santos - SP, INPE, maio.2017.

MARTÍ, F.; FORKAN, A. R. M.; JAYARAMAN, P. P.; MCCARTHY, C.; GHADERI, H. LogLiDAR: An Internet of Things Solution for Counting and Scaling Logs. **IEEE – International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events**. Kassel, Alemanha, v.1, p. 413-415, maio.2021.

MELO, A. M.; PEREIRA, R.; SILVEIRA, D.; GORGENS, E. B. Uso de veículos aéreo não tripulado no monitoramento de pátios de carvão. **XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE- Santos, São Paulo, v. 1, p. 2018- 2021, abr.2019.

SAARINEN, N.; KANKARE, V.; VASTARANTA, M.; LUOMA, V.; PYORALA, J.; TANHUANPAA, T.; LIANG, X.; KAARTINEN, H.; KUKKO, A.; JAAKKOLA, A.; YU, X.; HOLOPAINEN, M.; HYYPPA, J. Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. **Elsevier**. v. 123, p. 140-158, jan.2017.

SCOLFORO et al. **Inventário Florestal de Minas Gerais**. v. 3. Lavras, MG: UFLA, 2008.

SIEGEL, S.; CASTELLAN N. J. **Estatística Não-paramétrica para Ciência do Comportamento**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

SILVA, C. A.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. **Bol. Ciênc. Geod.** Curitiba, v. 22, n. 1, p. 73-94, mar.2016.

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

SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, J. C.; FILHO, M. B. N.; RIBEIRO, J. C. L. Determinação de Fatores de Empilhamento Através de Fotografias Digitais. **Revista Árvore**, Viçosa –MG, v.27, n.4, p.473-479, 2003.

WATT, P. J.; DONOGHUE, D. N. M. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. **International Journal of Remote Sensing**. v. 26, n. 7, p. 1437-1446, abr.2005.

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

No setor florestal, a gestão do estoque de madeira é crucial para a cadeia de abastecimento e logística. A fotogrametria com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) 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 capítulo 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.

3.1 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 (Pasztery *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 (Pasztery *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 (Pasztery *et al.*, 2019; Diez *et al.*, 2021). Tal volume é conhecido como volume em estéreo (Soares *et al.*, 2012). Dependendo da uniformidade da altura do empilhamento e do comprimento total da pilha, é recomendável dividi-la em seções de igual comprimento para medição da altura em diferentes pontos (Soares *et al.*, 2012; Pasztery *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 e Avdan (2023). Nesse sentido, a fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) tem se destacado devido ao seu alto desempenho na reconstrução tridimensional de objetos e estruturas, conforme relato por Rangel *et al.* (2018), Nesbit e Hugenholtz (2019), Garcia e Oliveira (2021), Moreira *et al.* (2021), Dai *et al.* (2023), Deliry e Avdan (2023) e Turk *et al.* (2024). A combinação de ARPs com fluxos de trabalho fotogramétricos por estrutura de movimento (SfM) e estereopsia multivista (MVS) tem sido aplicada em diferentes contextos para análises volumétricas, incluindo o 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), a medição de pilhas de argila e rejeitos (Silva *et al.*, 2016; Esteves *et al.*, 2020), a modelagem de terreno (Nesbit e Hugenholtz, 2019; Dai *et al.*, 2023) e a volumetria de edifício (Vacca *et al.*, 2017; Deliry e Avdan, 2023).

Apesar dos avanços nas aplicações de ARPs 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, foi realizada uma análise preliminar com o 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.

3.2 Material e métodos

3.2.1 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).

3.2.2 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.

3.2.3 *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 considerada 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 e Avdan, 2023). A qualidade de reconstrução foi considerada como ultraelevada, 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 e 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.

3.2.4 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 aerolevanteamento 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.

3.3 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 interquartilico das estimativas (st).

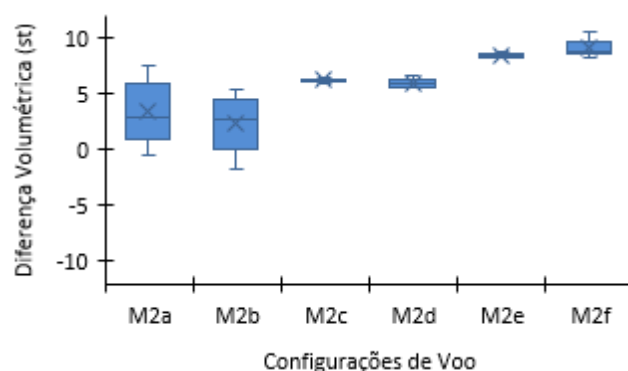
Método	Mediana do volume (st)	Volume Mínimo (st)	Volume Máximo (st)	Intervalo Interquartilico (st)
M2a	30,92	27.51	35.50	4,99
M2b	30,71	26.34	33.45	4,59
M2c	34,21	34.01	34.44	0,29
M2d	33,90	33.62	34.57	0,75
M2e	36,43	36.24	36.71	0,30

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 2).

Figura 2 – Dispersão da variação do volume estimado com aerolevantamento em relação ao volume estimado pelo método convencional.



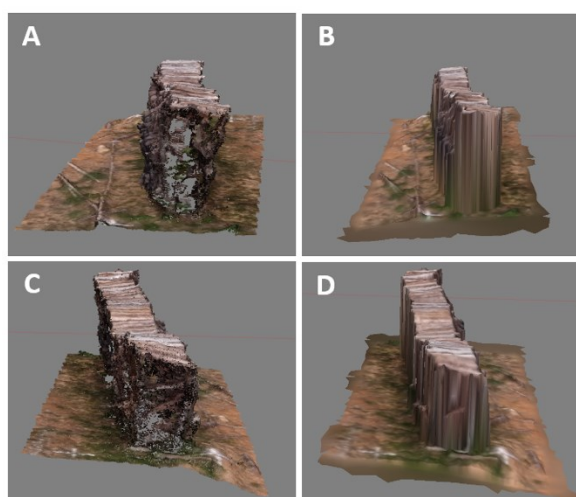
A maior variação entre os volumes estimados para as repetições dentro das duas configurações de voo com inclinação de câmera de 90° pode ser explicada pela possível presença de distorções sistemáticas, o que é conhecido como erro de doming (Dai *et al.*, 2023). O doming é resultante de erros associados 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 e 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 2), 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 e 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 e Avdan, 2023). Deste modo, as madeiras que estão fora do arranjo principal da pilha, conforme visualizado na nuvem de pontos (Figura 3-A-C) foram interpretadas verticalmente como parte sólida da pilha de cima para baixo, ocasionando o rebatimento destas peças (Figura 3-B-D). Esse comportamento também foi constatado por Deliry e 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 3 – 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.

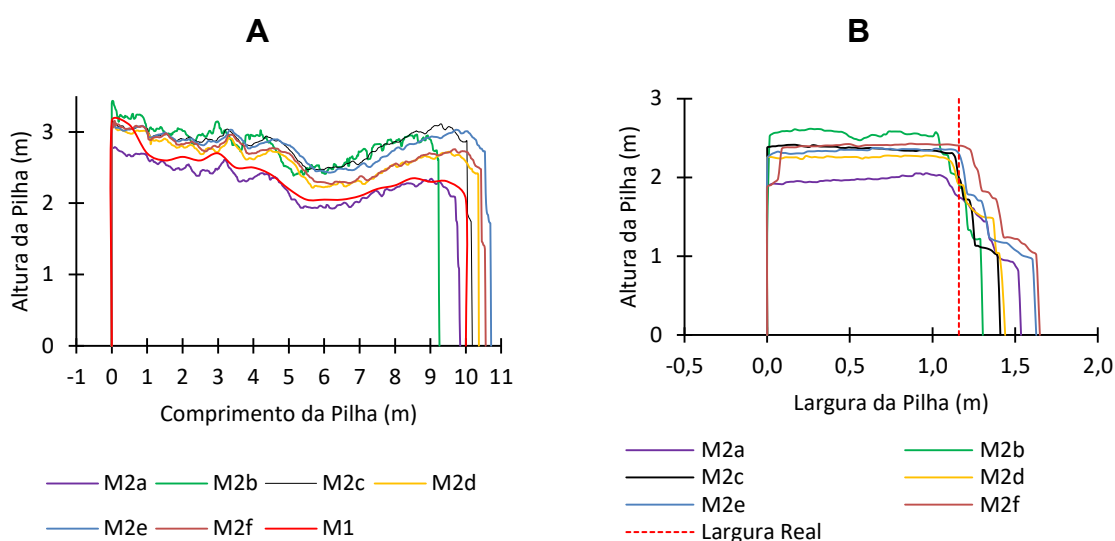


Outra possível explicação para o comportamento observado está associada à presença do erro de posicionamento das imagens. A precisão posicional das imagens desempenha papel crucial para a realização adequada das análises subsequentes, e essa precisão é dependente da plataforma utilizada (Tomastik *et 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 da complexidade da cena ocasionando a intensificação de erros de posicionamento (Xie *et al.*, 2016; López *et al.*, 2020; Maset e 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 e Avdan, 2023). Dessa maneira, a presença de erros de posicionamento pode explicar as deformidades geométricas observadas na pilha (Figura 4), com aumento da ocorrência de erros planimétricos e altimétricos, devido aos efeitos negativos presentes na distribuição dos pontos da nuvem densa e conseqüentemente 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 4 – 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 câmara 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 aerolevanteamento, para as configurações de voo analisadas.

Método	M2a	M2b	M2c	M2d	M2e
M2a					
M2b	0,6905 ^{n.s}				
M2c	0,1508 ^{n.s}	0,0079*			
M2d	0,1508 ^{n.s}	0,0079*	0,3095 ^{n.s}		
M2e	0,0079*	0,0079*	0,0079*	0,0079*	
M2f	0,0079*	0,0079*	0,0079*	0,0079*	0,0952 ^{n.s}

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°. *indica diferenças estatisticamente significativas e n.s indica diferenças estatisticamente não significativas.

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 câmara em nadir (90°) mostrou-se mais viável do que o imageamento com câmara 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 (ARP), 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 e Hugenholtz, 2019; Dai *et al.*, 2023), alterações geomórficas (James *et al.*, 2020) e volumetria de edifício (Vacca *et al.*, 2017; Deliry e

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 e 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 e 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 aerolevanteamento. Isso contribui para o alinhamento adequado das imagens e, conseqüentemente, 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 ARPs 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 ARPs 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.

3.4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que a configuração de voo adotada para o aerolevante 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.

3.5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Drones e a Meteorologia**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/segurancaoperacional/meteorologia-aeronautica/assuntos-relacionados/drones-e-ameteorologia#:~:text=Acima%20dessa%20velocidade%2C%20o%20n%C3%ADvel,acima%20de%2036%20km%2Fh>.

BERENDT, F. WOLFGRAMM, F.; CREMER, T. 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.; MELO, A.; UMBELINO, G. J. M.; MUND, J. P.; SANTOS, J. G.; ROSETTE, J.; SILVEIRA, D.; GORGENS, E. B. 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.; ZHENG, G.; ANTONIAZZA, G.; ZHAO, F.; CHEN, K.; LU, W.; LANE, S. N. 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.; ESTEBAN, T.E.; CREMER, T. 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.; BAUMGART, P.; MASS, H. G.; FAUST, D. 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>

ESTEVEES, V.M.; FERNANDES, H. E.; NETO, O. J. S.; SILVA, R. P.; PARZZANINI, P. 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.; OLIVEIRA, M. V. N.; LOCKS, C. J.; PAPA, D. A. **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-empati-os-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, câmera 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.; LOPES, E. S.; FILHO, P. C. O. 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.; ANTONIAZZA, G.; ROBSON, S.; LANE, S. N. 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.; NURMELA, S.; KARVONEN, H.; KIVINEN, V. P.; MELKAS, T.; NIEMINEN, M. 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.; GARCIA, J. L. P.; CALVACHE, A. T. M.; GARCIA, J. D. 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.; PEREIRA, R.; SILVEIRA, D.; GORGENS, E. B. 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.; GOYANES, G.; PINA, P.; VASSILEV, O.; HELENO, S. 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.; HEINZMANN, B.; BARBU, M. C. Comparison of different stack measuring methods. **Sibirskij Lesnoj Zurnal**. v. 3, p. 5-13, 2019. DOI: 10.15372/SJFS20190301

PURFÜRST, T.; DÍEZ, M.F.; BERENDT, F.; ENGLER, B.; CREMER, T. 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.; GONÇALVES, G. T.; PÉREZ, J. A. 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.; MANCINI, F.; DUBBINI, M.; MAZZONE, F.; CAPRA, A. 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.; CHIABRANDO, F.; SPANÒ, A. 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.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. 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.; MOKROS, M.; SALON, S.; CHUDY, F.; TUNÁK, D. 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.; ÖZÇELİK, V.; AKDUMAN, E. Capabilities of using UAV and close range photogrammetry to determine short-term soil losses in forest road cut slopes in semi-arid mountainous áreas. **Environmental Monitoring and Assessment**. v.196, p.1-18, 2024. DOI: 10.1007/s10661-024-12339-1

VACCA, G.; DESSI, A.; SACCO, A. 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.; HU, H.; WANG, J.; ZHU, Q.; CHEN, M. 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.; ZHANG, Y.; SU, C. 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

4 ESTIMATIVA DO VOLUME DE PILHAS DE MADEIRA EM CAMPO UTILIZANDO DRONE DE BAIXO CUSTO

Os avanços técnicos envolvendo às aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) e o desenvolvimento de algoritmos para processamento baseados na estrutura de movimento (SfM) e estereopsia multivista (MVS) têm contribuído para a crescente utilização de aerolevantamentos na área de manejo florestal. Até o momento, poucos estudos abordaram a aplicação de ARPs para obtenção de estimativas do volume de pilhas de madeira. A avaliação das variáveis influentes que inclui o próprio plano de voo, permanece como uma lacuna operacional que merece destaque nas investigações para aplicações florestais. Isso possibilitará a difusão dessa tecnologia no setor. Portanto, neste estudo buscou compreender se diferentes planos de voo podem gerar estimativas precisas para o volume de pilhas de madeira em condições de campo.

4.1 Introdução

O gerenciamento do estoque de madeira é uma tarefa importante nas empresas florestais do ramo madeireiro, garantindo o fluxo contínuo e logística adequada das operações que ligam a silvicultura a indústria. A quantificação do volume empilhado de madeira é fundamental para essa gestão, demandando a realização de inventários periódicos. Com essa finalidade, diferentes métodos têm sido utilizados para estimar o volume das pilhas tanto no campo quanto em pátios de estocagem, a exemplo da medição manual (Heinzmann; Barbu, 2017), medição com fotografia terrestre (Karha *et al.*, 2019), uso de sensor LiDAR (Martí *et al.*, 2021) e imageamento aéreo com utilização de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) (Figueiredo *et al.*, 2016; Heraki *et al.*, 2022).

Dentre tais métodos, o imageamento aéreo tem se destacado em função da diminuição dos custos dos equipamentos, dos avanços técnicos envolvendo aeronaves remotamente pilotadas (ARP) e do desenvolvimento de algoritmos para processamento de imagens. Nesse sentido, destaca-se a tecnologia fotogramétrica por estrutura de movimento (SfM) e estereopsia multivista (MVS), a qual tem se tornado uma ferramenta essencial para os levantamentos aéreos com fins de análises do volume dos objetos na

superfície (Vacca *et al.*, 2017; Nesbit; Hugenholtz, 2019; Dai *et al.*, 2023; Deliry; Avdan, 2023). Essa abordagem oferece benefícios significativos ao possibilitar a obtenção de representações da superfície terrestre com custo inferior aos obtidos por meio da detecção e varredura por luz (LiDAR) (Nakata *et al.*, 2023).

O uso de ARP já têm contribuído para a mensuração florestal, a exemplo do seu uso para estimativa de variáveis dendrométricas (Tudoran *et al.*, 2021), monitoramento florestal (Frey *et al.*, 2018; Seifert *et al.*, 2019; Denter *et al.*, 2022), avaliação das condições de estradas florestais (Siafali; Tsioras, 2024; Türk; Canyurt, 2024b), inventário florestal (Kotivuori *et al.*, 2020; Goodbody *et al.*, 2021; Moreira *et al.*, 2021), inventário de madeira empilhada (Figueiredo *et al.*, 2016; Heraki *et al.*, 2022) e inventário de pilhas de carvão vegetal (Melo *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2021).

Apesar dos avanços tecnológicos mencionados, a medição manual de madeira empilhada permanece sendo amplamente adotada no setor florestal em diversas partes do mundo (Paszatory *et al.*, 2019). Contudo, esse método apresenta desafios operacionais à medida em que há o aumento no número de pilhas, o que proporciona acréscimo no tempo de coleta e nos custos associados à obtenção dos dados (Karha *et al.*, 2019; Purfürst *et al.*, 2023).

Nesse panorama, a gestão do estoque de madeira por meio de levantamento aéreo com técnica SfM-MVS é uma alternativa ao método manual (Paszatory *et al.*, 2019; Berendt *et al.*, 2021; Heraki *et al.*, 2022; Purfürst *et al.*, 2023). No entanto, são raros os trabalhos científicos envolvendo a utilização de levantamentos aéreos para estimativa do volume de pilhas de madeira. Esse fato tem perpetuado um conhecimento limitado acerca das variáveis de influência das estimativas volumétricas, incluindo o plano de voo (Dai *et al.*, 2023), os tipos de ARP, a utilização ou não de pontos de controle mapeados com receptor GNSS RTK e os parâmetros considerados no processamento das fotografias aéreas, dentre outros.

Nesse sentido, é importante que novos estudos sejam desenvolvidos de maneira a entender como as diferentes configurações dos levantamentos aéreos podem influenciar a qualidade das estimativas volumétricas. Isso faz com que o conhecimento acerca da utilização de ARP possa ser difundido no setor florestal de maneira consistente. Considerando isso, o objetivo deste estudo foi avaliar se diferentes planos de voo podem gerar estimativas precisas para o volume de pilhas de madeira em

condição de campo, mesmo com o uso de equipamentos de baixo custo e sem utilização de pontos de controle.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Descrição dos dados

Os dados utilizados neste estudo são oriundos da medição e do imageamento de 24 pilhas de madeira roliça de *Eucalyptus* sp. dispostas em uma área de plantio florestal pertencente a empresa GELF Siderurgia S.A., localizada na zona rural do município de Itacambira (16°51'49.41"S, 43°26'52.76"O), região norte do estado de Minas Gerais, Brasil. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Aw (tropical com estação seca no inverno) (Martins *et al.*, 2018). De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os anos de 2003 a 2023, a região apresenta temperatura média anual igual a 23°C e precipitação média anual de 912 mm. A altitude média do local é igual a 1.200 m. As medições foram realizadas no dia 16 de novembro de 2023 sob condições atmosféricas estáveis, com baixa nebulosidade, sem ventos intensos.

As toras foram empilhadas imediatamente após a etapa de colheita florestal e ao longo das bordas de dois talhões vizinhos. As pilhas foram organizadas de acordo com a posição das toras ao longo do fuste, originando doze pilhas com madeira da base das árvores (toras mais grossas) e o restante com toras obtidas do topo das árvores (toras mais finas). As pilhas com toras finas estavam dispostas no interior do talhão, enquanto as pilhas formadas por toras de maior diâmetro estavam dispostas nas margens da estrada (Figura 5).

Figura 5 – Disposição das pilhas de madeira no campo. As letras indicam a posição das pilhas em relação aos talhões de plantio: A indica pilha interna e B indica pilha externa.



Os volumes das pilhas de madeira foram obtidos por medição manual (método convencional) e medição com utilização de imageamento aéreo considerando três diferentes planos de voos.

4.2.2 *Medição convencional*

A medição convencional consistiu na mensuração das dimensões das pilhas de madeira, o que inclui altura, largura e comprimento total da pilha. Em função do padrão de traçamento adotado, todas as pilhas amostradas apresentaram largura média de quatro metros, enquanto as medidas de comprimento e altura variaram entre as pilhas e foram mensuradas em campo. O comprimento total das pilhas foi obtido com auxílio de uma trena de fibra de vidro de 50 m. As alturas das pilhas foram coletadas ao longo do comprimento das mesmas considerando o uso de trena e um intervalo de dois metros entre as medições. O volume em estéreo de cada pilha de madeira (VPma) foi calculado de acordo com a equação (1).

$$V_{st} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(H_i + H_{i+1}) \cdot D}{2} \right] \cdot \bar{C} \quad (1)$$

Em que: V_{st} é o volume da pilha de madeira (em estéreo), \bar{C} é o comprimento médio das toras (em metros), n é o número de observações, H_i é a altura da pilha no ponto i (em metros) e D é o intervalo entre as medições de altura (em metros).

4.2.3 *Levantamento aéreo*

Utilizou-se um drone de baixo custo (DJI Mini 2) equipado com receptor GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) e câmera com sensor CMOS RGB de resolução efetiva igual a 12 megapixels para obtenção de fotografias aéreas das pilhas de madeira. Três diferentes configurações de voo para coleta dos dados aéreos foram avaliadas, sendo eles:

- VP20: altura de voo de 20 m, sobreposição frontal e lateral de 70% e voo em grade simples;
- VP50: altura de voo de 50 m, sobreposição frontal e lateral de 70% e voo em grade dupla;

- VP80: altura de voo de 80 m, sobreposição frontal e lateral de 80% e voo em grade dupla.

Os planos de voo foram elaborados utilizando o aplicativo Drone Harmony (Drone Harmony AG, 2024). A inclinação da câmera em relação ao eixo da aeronave foi fixada em 90° (visada em nadir). 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.

4.2.4 Processamento das imagens

O processamento das imagens aéreas foi realizado com utilização da 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 produção de ortoimagens e modelos digitais de elevação (MDE) de alta resolução e baixo custo computacional (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 (Agisoft, 2019) instalada 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 seis etapas foi estabelecido para o cálculo do volume das pilhas de madeira. 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 um 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 para cada um dos três aerolevantamentos avaliados.

A etapa 2 corresponde ao alinhamento das imagens a partir de pontos coincidentes entre diferentes fotografias. Nessa etapa, os algoritmos SfM estimam a orientação interna e externa do sensor com base nas correspondências de múltiplas fotografias sobreposta e geram uma nuvem de pontos esparsa (Denter *et al.*, 2022). 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 considerada 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. Os parâmetros considerados foram a distância focal medida em pixels (f), as coordenadas do ponto principal (c_x , c_y), os coeficientes de transformação de afinidade e inclinação (b_1 , b_2), os coeficientes de distorção radial (k_1 , k_2 , k_3 , k_4) e os coeficientes de distorção tangencial (p_1 , p_2 , p_3 e p_4). A otimização da nuvem esparsa de pontos é tida como uma das etapas mais importantes em termo de precisão do MDE, sendo recomendado a aplicação de todos os parâmetros de otimização possíveis, os quais incluem distorção radial e tangencial, afinidade, inclinação e ortogonalidade (Sledz; Ewertowski, 2022). 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 baseado na correspondência de pixels de imagens sobrepostas (Denter *et al.*, 2022; Deliry; Avdan, 2023). A qualidade de reconstrução foi considerada como ultraelevada, a qual se baseia no processamento das fotos em tamanho original. 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).

Na etapa 4 foram produzidos dois modelos digitais de elevação (MDE) para cada um dos projetos de voo analisados, os quais se diferenciaram pela utilização ou não da interpolação dos pontos da nuvem densa. Isso permitiu avaliar a existência de áreas sem cobertura da nuvem densa de pontos. Os MDE criados considerando a interpolação foram utilizados para obter a estimativa do volume das pilhas de madeira na etapa final do processamento.

A etapa 5 consistiu na criação dos ortomosaicos, e a etapa 6 foi obtenção dos volumes das pilhas de madeira. Nesta etapa, o volume em estéreo (st) das pilhas de madeira foi quantificado com uso da ferramenta de mensuração do próprio Agisoft Metashape (Agisoft, 2019). Para isso, foi necessário a delimitação de um polígono ao redor de cada pilha de madeira utilizando-se o ortomosaico. A superfície abaixo da pilha foi definida a partir da interpolação dos valores de altitude próximos aos limites do polígono, sendo considerado o plano de melhor ajuste fornecido pelo software.

4.2.5 Análise dos resultados

A precisão das estimativas do volume das pilhas de madeira obtidas considerando cada levantamento aéreo (VP20, VP50 e VP80) em relação ao método convencional (VPma) foi verificada a partir da análise do desvio padrão residual em estéreos (equação 2), do erro quadrático médio percentual (equação 3) e da correlação de Spearman entre os volumes estimados e esperados (equação 4).

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

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

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{(n^2 - 1)} \quad (4)$$

Em que: \hat{Y} é o volume estimado por método convencional, Y é o volume estimado por aerolevanteamento, n é o número de observações, \bar{Y} é a média do volume estimado por método convencional e \bar{Y} é a média do volume estimado por método aerolevanteamento.

O teste não paramétrico de postos sinalizados de Wilcoxon foi aplicado para avaliar a significância das diferenças entre as estimativas do volume das pilhas de madeira obtidas com aerolevanteamento e pelo método convencional, uma vez que o pressuposto de normalidade não foi alcançado conforme teste de Shapiro-Wilk a um nível de significância de 5%. O contraste entre as medianas das estimativas foi realizado com uso da função “wilcox.test” a um nível de significância de 5%. A análise foi realizada com auxílio do Software R Core Team (2023).

Para cada pilha de madeira, calculou-se a diferença percentual (d%) entre o volume da pilha obtido com os distintos métodos de levantamento aéreo (VP) e o volume

calculado pelo método convencional (VPma) (equação 5). Os valores percentuais de d% foram utilizados para elaboração de gráficos de dispersão em função do volume das pilhas (st), do comprimento das pilhas (m) e da altura média das pilhas (m).

$$d_{\%} = \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\hat{Y}_i} \right) * 100 \quad (5)$$

Em que: d% é a diferença percentual entre o volume da pilha obtido com o levantamento aéreo, Y é o volume obtido por levantamento aéreo (VP20, VP50 e VP80), \hat{Y} é o volume obtido pelo método convencional.

4.3 Resultados

A altura média das pilhas variou de 0,60 a 1,33 m e o comprimento total variou entre 14,9 m e 145,0 m. O volume das pilhas variou entre 45,43 st a 845,90 st (Tabela 4).

Tabela 4 – Descrição dos dados das 24 pilhas de madeiras amostradas segundo método convencional para estimativa de volume da pilha (st).

Pilha	Posição	Altura Média (m)	Comprimento (m)	Volume (st)	Pilha	Posição	Altura Média (m)	Comprimento (m)	Volume (st)
1	Externa	1,14	35,00	185,67	13	Externa	0,84	30,30	121,00
2	Interna	0,73	35,00	118,59	14	Interna	0,69	28,10	93,46
3	Externa	0,82	15,00	61,17	15	Externa	1,04	32,10	159,16
4	Interna	0,60	14,90	45,43	16	Interna	0,81	28,70	110,55
5	Externa	1,24	57,00	318,61	17	Externa	1,32	38,60	234,83
6	Interna	0,84	55,30	207,72	18	Interna	0,74	38,50	132,97
7	Externa	1,32	67,50	395,76	19	Externa	1,33	145,00	845,90
8	Interna	0,82	66,70	247,55	20	Interna	0,79	142,80	494,65
9	Externa	1,11	87,80	429,20	21	Externa	0,95	27,00	122,72
10	Interna	0,77	85,50	290,06	22	Interna	0,63	27,30	80,90
11	Externa	0,92	57,50	237,19	23	Externa	1,15	140,30	712,79
12	Interna	0,61	56,50	155,70	24	Interna	0,62	139,40	378,95

O tempo total gasto para captura das imagens nos levantamentos aéreos variou entre 11 min (VP20) e 15 min (VP50). A distância percorrida pela ARP durante os imageamentos foi de 4,3 km, 3,5 km e 3,4 km para os planos de voo VP20, VP50 e VP80, respectivamente. Os levantamentos aéreos VP50 e VP80, realizados em grade dupla, geraram 59 e 52 pontos de viragem (mudança de direção da aeronave), enquanto o

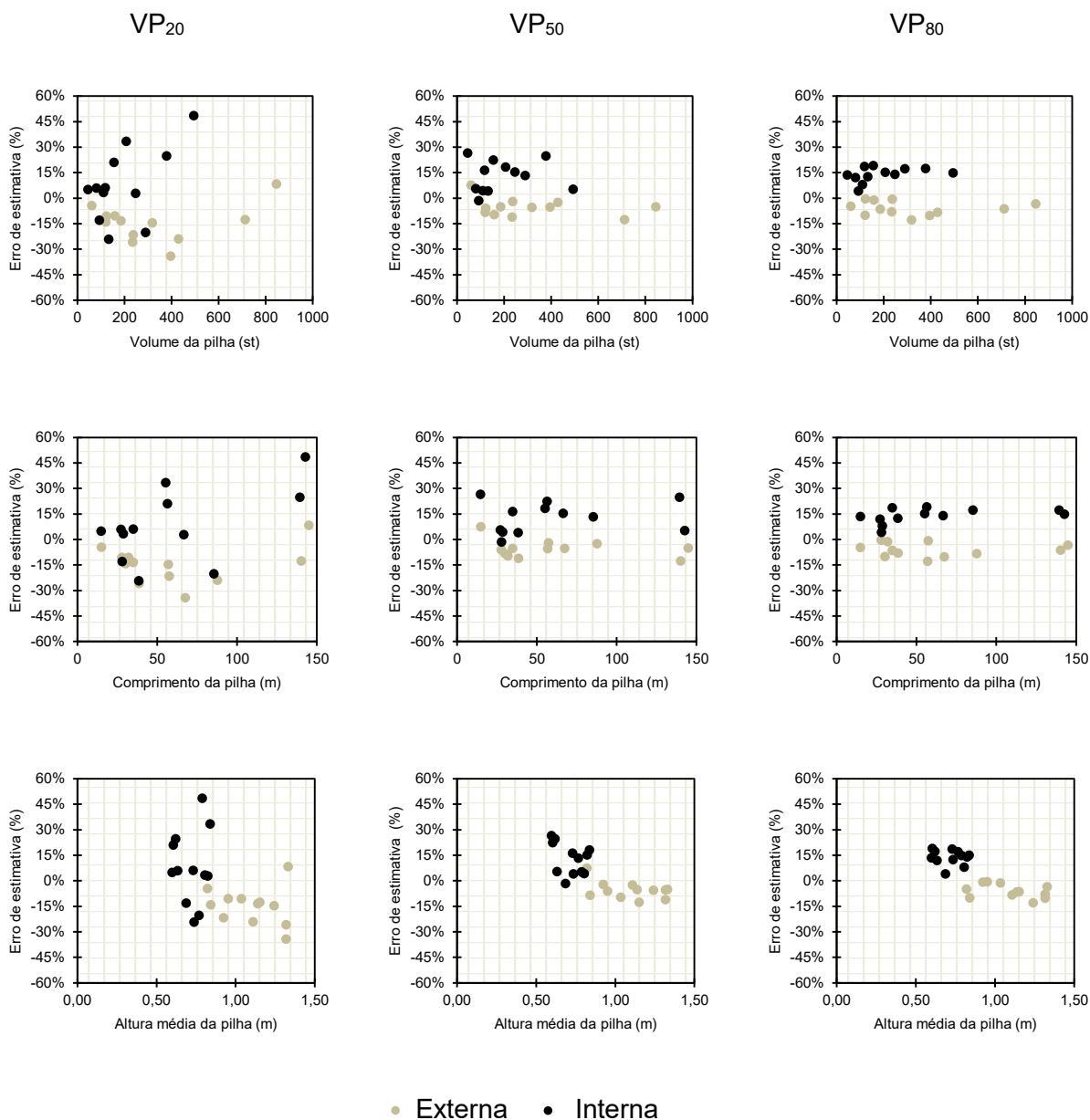
aerolevanteamento VP20 gerou apenas 15 pontos de viragem. Os levantamentos VP20, VP50 e VP80 geraram 454, 211 e 192 fotografias, respectivamente.

O processamento das imagens obtidas com o plano de voo VP20 gerou uma nuvem densa de pontos com cerca de 35.244 pontos/m², enquanto os processamentos dos planos de voo VP50 e VP80 geraram nuvens de pontos com 12.080 pontos/m² e 6.171 pontos/m². A resolução espacial dos modelos digitais de elevação obtidos para cada processamento foi igual a 0,74 cm/pixel para dados do plano de voo VP20, 1,74 cm/pixel, para o VP50 e 2,72 cm/pixel para VP80.

A nuvem densa de pontos gerada ao realizar o processamento das imagens aéreas obtidas para cada um dos três planos de voo (VP20, VP50 e VP80) apresentou zonas sem dados (gap zones). O percentual de falhas no MDE reduziu do plano de voo VP20 para plano o VP50 e do plano de voo VP50 para o plano VP80, representando um percentual de zonas sem dados de 10,15%, 0,97% e 0,23%, respectivamente.

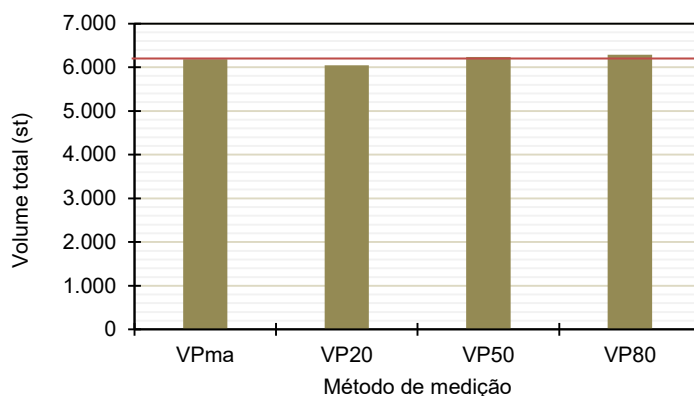
As estimativas dos volumes individuais das pilhas de madeira obtidas considerando dados do plano de voo VP20 apresentaram maior dispersão do erro que os demais. Nesse caso, os erros variaram entre -34,3% e 48,4%. Os erros variaram entre -12,7% e 26,4% e entre -13,0% e 19,0% para os aerolevanteamentos VP50 e VP80, respectivamente. Não houve tendência de aumento ou diminuição do erro de estimativa em razão do volume das pilhas de madeira, do comprimento das pilhas ou em função da altura média das pilhas (Figura 6). Pilhas compostas por toras de maior diâmetro e dispostas próximas à estrada tiveram tendência de subestimativa do volume e pilhas situadas na parte interior do talhão e com toras de menor diâmetro tiveram tendência de superestimar o volume para todos os métodos avaliados.

Figura 6 – Dispersão do erro de estimativa em função do volume das pilhas de madeira, do comprimento da pilha e da altura média das pilhas.



O volume total calculado com dados obtidos considerando o plano de voo VP20 foi 2,29% menor que o volume total calculado considerando a medição manual (Tabela 5). Os volumes totais das pilhas de madeira obtidos considerando os aerolevantamentos VP50 e VP80 foram superiores ao volume total calculado considerando o método manual em 0,92% e 1,69%, respectivamente.

Figura 7 – Estimativa de volume total das pilhas de madeira para os métodos convencional (VP_{ma}) e para os três diferentes métodos de aerolevanteamento (VP_{20} , VP_{50} e VP_{80}).



O plano de voo VP_{80} apresentou o menor valor para o desvio padrão residual e para o erro quadrático médio percentual, além do maior valor para correlação entre os valores estimados e os valores calculados pelo método manual. As correlações entre as estimativas volumétrica das pilhas segundo método manual e para os três planos de voo avaliados são estatisticamente significativas ($\alpha = 5\%$), com valor-p inferior a $1,0e-06$. Os piores resultados foram obtidos com o plano de voo VP_{20} , apresentando maior S_{yx} , maior RMSE (%) e menor correlação. O plano de voo VP_{80} gerou valores de desvio padrão mais próximos ao observado para o método manual (VP_{ma}).

Destaca-se que, sob as condições deste experimento, o aerolevanteamento VP_{80} , com altura de voo de 80 m, sobreposição frontal e lateral de 80% e voo em grade dupla, demonstrou maior precisão nas estimativas geradas.

Tabela 5 – Análise descritiva das estimativas de volume das pilhas de madeira para os métodos convencional (VP_{ma}) e para os três diferentes métodos de aerolevanteamento (VP_{20} , VP_{50} e VP_{80}).

Plano de Voo	Soma (st)	Mediana (st)	Mínimo (st)	Máximo (st)	Desvio Padrão (st)	S_{yx}	RMSE (%)	Correlação
VP_{ma}	6.180,51	196,70	45,43	845,89	202,31	-	-	-
VP_{20}	6.041,17	179,78	47,63	915,62	222,31	71,93	27,64	0,9478
VP_{50}	6.237,09	199,48	57,43	802,17	191,49	33,33	12,81	0,9843
VP_{80}	6.284,69	200,54	51,54	816,12	196,86	31,27	12,02	0,9852

De acordo com o teste de Wilcoxon (Tabela 6), não houve diferenças estatisticamente significativas ($\alpha = 5\%$) entre as medianas das estimativas dos volumes das pilhas de madeira entre os três diferentes métodos de aerolevanteamento (VP20, VP50 e VP80) e o método manual (VPma). O plano de voo VP20 diferiu estatisticamente dos planos de voo VP50 e VP80, pelo teste de Wilcoxon.

Tabela 6 – Resultados do teste não paramétrico de postos sinalizados de Wilcoxon.

Teste de Wilcoxon	V valor	Valor-p
VPma vs VP20	186	0,3165n.s
VPma vs VP50	142	0,8334n.s
VPma vs VP80	134	0,6634n.s
VP20 vs VP50	57	0,0251*
VP20 vs VP80	78	0,0395*
VP50 vs VP80	132	0,6231n.s

Legenda: *indica diferenças estatisticamente significativas e n.s indica diferenças estatisticamente não significativas.

4.4 Discussão

As condições atmosféricas estáveis no dia da coleta dos dados não representam risco para a execução dos levantamentos aéreos (ANAC, 2017; XING et al., 2023) e não proporcionaram impactos significativos neste estudo. Assim, o menor tempo de voo obtido para o aerolevanteamento VP20 pode ser atribuído à realização do levantamento em grade simples, o qual tende a apresentar tempo de captura das imagens inferior ao obtido com o trajeto em grade dupla. Este comportamento está associado ao maior número de pontos de viragem no voo em grade dupla. O tempo gasto na captura das imagens para os métodos avaliados está em conformidade com outros levantamentos aéreos descritos na literatura (Figueiredo *et al.*, 2016; Carvalho *et al.*, 2022).

A variação da resolução espacial dos modelos digitais de elevação ocorreu em função da alteração da distância de amostragem do solo (GSD) para os diferentes padrões de sobrevoo utilizados. O GSD em imagens digitais indica o tamanho da superfície representada por um único pixel da imagem, sendo influenciado principalmente pela altura de sobrevoo em condições de velocidade de voo e iluminação semelhantes (Kubista; Surovy, 2021). Dessa maneira, o aumento da altura de voo proporcionou o aumento do valor do GSD, reduzindo a escala das imagens e, por consequência, proporcionou a redução da resolução espacial do MDE. Isso gera uma

simplificação dos objetos presentes sobre a superfície sobrevoada (Kubista; Surovy, 2021; Carvalho *et al.*, 2022).

Ainda que o MDE obtido com dados oriundos do levantamento aéreo considerando o plano de voo VP20 tenha um melhor valor para o GSD, a utilização de voos com altura próxima ao solo (20 m) pode gerar problemas relacionados com a segurança da operação e com a maior demanda por recursos computacionais para o processamento das imagens coletadas (Figueiredo *et al.*, 2021). Além disso, a maior escala das imagens obtidas pelo aerolevanteamento VP20 reduz o campo de visão e impede a coleta de mais informações por imagem (Kwon *et al.*, 2024), o que pode ter contribuído para a dificuldade do algoritmo em identificar pontos coincidentes entre diferentes imagens, prejudicando a construção da nuvem de pontos, conforme mencionado por Bhatt *et al.* (2022).

Assim, a escala das imagens adquiridas no aerolevanteamento VP20 contribuiu para o aumento de zonas sem dados (*gap zones*) na nuvem densa de pontos. Isso causou a ocorrência de extensas áreas cujos valores de altitude foram interpolados, gerando um modelo digital de elevação não fiel à realidade de campo. Já para os planos de voo VP50 e VP80 a ocorrência de zonas sem dados foi inferior a 1% não ocasionando danos para construção do MDE.

Os erros de estimativa de volume obtidos a partir do aerolevanteamento VP20 apresentaram a maior variação quando comparado aos demais métodos, evidenciando a importância da definição adequada das configurações de voo no momento do planejamento do levantamento. Por sua vez, ao analisar as estimativas dos volumes individuais das pilhas de madeira, é identificado uma tendência da redução do erro de estimativa à medida que há variação na configuração de voo do aerolevanteamento VP20 para VP50 e de VP50 para VP80. Em estudo com a utilização de veículo aéreo não tripulado para estimativa do volume de pilhas de carvão, Carvalho *et al.* (2022) demonstraram, que a redução da resolução espacial, nesse caso ocasionada pela parametrização de processamento, proporciona a redução do erro de estimativa volumétrica em comparação com o método convencional com RTK (*Real-time kinematic*). Dessa forma, o menor desvio padrão residual obtido para o plano de voo VP80 pode ser atribuído à redução da resolução espacial do MDE e ao baixo percentual de zonas sem dados. Este comportamento também foi observado por Heraki *et al.* (2022) na tentativa de quantificar o volume de madeira empilhada em um pátio industrial.

Quanto às fontes de variação associadas ao inventário de madeira empilhada com aerolevante, observa-se que não há uma tendência no aumento ou redução dos erros de estimativa em razão do volume das pilhas, do comprimento total ou da altura média das pilhas. Porém, para todos os métodos analisados, são constatadas a tendência de subestimativa do volume das pilhas posicionadas na borda externa do talhão e uma superestimativa do volume das pilhas posicionadas na parte interna do talhão. As pilhas posicionadas próximas à estrada apresentaram altura média maior que as demais e são compostas por toras de maior diâmetro, retiradas da base da árvore.

Figueiredo *et al.* (2016) não identificaram influência da dimensão das toras em relação aos erros de estimativa de volume considerando dados de imageamento aéreo, o que pode indicar que a causa principal do resultado encontrado seja a disposição das pilhas no campo. Entretanto, é necessário que novos estudos sejam feitos de maneira a identificar o que de fato contribuiu para tal resultado, se isso é causado pela posição das pilhas ou pelo diâmetro das toras que compõem cada pilha.

De acordo com o teste de Wilcoxon, as estimativas geradas considerando dados de aerolevante com abordagem fotogramétrica SfM-MVS não diferiram estatisticamente daquelas obtidas pela medição manual, evidenciando a viabilidade da utilização de imagens aéreas para reconstrução tridimensional e análise volumétrica de pilhas de madeira dispostas no campo. Contudo, dentre os planos de voo analisados, o aerolevante VP80 se destacou ao apresentar menor variação nas estimativas dos volumes das pilhas de madeira em comparação com o método convencional. Além disso, essa configuração de voo apresenta vantagens operacionais, incluindo menor tempo de voo, menor número de fotografias necessárias e maior segurança no momento do aerolevante, visto que a uma altura de voo de 80 m garante a retirada de obstáculos como árvores e linha de transmissão de energia da linha de voo. Esse fato contribui para a minimização do consumo de bateria e capacidade de armazenamento durante os levantamentos aéreos.

De fato, a condução de estudos utilizando veículos aéreos não tripulados na gestão do estoque de madeira proporciona ganhos, especialmente no que diz respeito à disponibilidade de dados com maior frequência, menor custo e com menor probabilidade de erros operacionais quando comparado à medição manual (KARHA *et al.*, 2019; Purfürst *et al.*, 2023).

4.5 Conclusão

As análises comparativas das estimativas volumétricas, segundo as três metodologias de aerolevante avaliadas (VP20, VP50, VP80), revelam que não há diferença estatística significativa em relação ao método convencional, demonstrando que os três planos de voo avaliados geraram estimativas precisas para o volume de pilhas de madeira em condição de campo com a uso de equipamentos de baixo custo e sem utilização de pontos de controle.

4.6 REFERÊNCIAS

AGISOFT. **Agisoft Metashape**. Available at: < <https://www.agisoft.com/>>. Accessed on: July. 1 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Drones e a Meteorologia**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/assuntosrelacionados/drones-e-ameteorologia#:~:text=Acima%20dessa%20velocidade%2C%20o%20n%C3%ADvel,acima%20de%2036%20km%2Fh>

BHATT, P., EDSON, C., & MACLEAN, A. Image Processing in Dense Forest Areas using Unmanned Aerial System (UAS). **Michigan Technological University**. v.1, p.1-34, 2022. <http://doi.org/10.37099/mtu.dc.michigantech-p/16366>

BERENDT, F.; WOLFGRAMM, F.; CREMER, T. 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.; MELO, A.; UMBELINO, G. J. M.; MUND, J. P.; SANTOS, J. G.; ROSETTE, J.; SILVEIRA, D.; GORGENS, E. B. 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>

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do Vale do Jequitinhonha – Diagnóstico do município de Itacambira-MG**. CPRM, 2005. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/16230/1/rel_cadastro_aguas_sub_itacambira.pdf

DAI, W.; ZHENG, G.; ANTONIAZZA, G.; ZHAO, F.; CHEN, K.; LU, W.; LANE, S. N. 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>

DENTER, M.; FREY, J.; KATTENBORN, T.; WEINACKER, H.; SEIFERT, T.; KOCH, B. Assessment of camera focal length influence on canopy reconstruction quality. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.6, p. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2022.100025>

DRONE HARMONY AG. **Drone Harmony 3d flight management platform**. Available at: em: <<https://droneharmony.com/>>. Accessed on: July. 1 2024.

ELTNER, A.; BAUMGART, P.; MAAS, H. G.; FAUST, D. 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>

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>.

FREY, J.; KOVACH, K.; STEMMLER, S.; KOCH, B. UAV Photogrammetry of forests as a Vulnerable Process. A sensitivity analysis for a structure from motion RGB-Image Pipeline. **Remote Sensing**. v.10, p.2-12, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10060912>

GOODBODY, T. R. H.; WHITE, J. C.; COOPS, N. C.; LEBOEUF, A. Benchmarking acquisition parameters for digital aerial photogrammetric data for forest inventory applications: Impacts of image overlap. **Remote Sensing of Environment**. v.265, p.1-16, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112677>

HEINZMANN, B.; BARBU, M. C. Comparison of volumetric measurement method and weight control for industrial timber with tree-by-tree measurement in the plant. **Austrian**

Journal of Forest Science. v.134, p.37-52, 2017.

HERAKI, L.; LOPES, E. S.; FILHO, P. C. O. 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.; ANTONIAZZA, G.; ROBSON, S.; LANE, S. N. 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.; NURMELA, S.; KARVONEN, H.; KIVINEN, V. P.; MELKAS, T.; NIEMINEN, M. 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>

KOTIVUORI, E.; KUKKONEN, M.; MEHTATALO, L.; MALTAMO, M.; KORHONEN, L.; PACKALEN, P. Forest inventories for small areas using drone imagery without in-situ field measurements. **Remote Sensing of Environment.** v.237, p.1-13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111404>

MARTINS, F.B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F.; REBOITA, M. S. Classificação Climática de KÖPPEN e Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, edição especial, p.129-156, 2018. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>

MARTÍ, F.; FORKAN, A. R. M.; JAYARAMAN, P. P.; MCCARTHY, C.; GHADERI, H. LogLiDAR: An Internet of Things Solution for Counting and Scaling Logs. **IEEE – International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events.** v.1, p. 413-415, 2021. <https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops51409.2021.9431022>

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.; PEREIRA, R.; SILVEIRA, D.; GORGENS, E. B. 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.; GOYANES, G.; PINA, P.; VASSILEV, O.; HELENO, S. 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>

NAKATA, Y.; IWASAKI, K.; SHIMODA, S.; TORITA, H. Understanding microtopography changes in agricultural landscapes through precision assessments of digital surface models by the UAV-RTK-PPK method without ground control points. **Smart Agricultural Technology**. v.5, p.1-9, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100269>.

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.; HEINZMANN, B.; BARBU, M. C. Comparison of different stack measuring methods. **Sibirskij Lesnoj Zurnal**. v. 3, p. 5-13, 2019. doi: 630.526.5/526.6/526.9/527.

PURFÜRST, T.; DÍEZ, M.F.; BERENDT, F.; ENGLER, B.; CREMER, T. 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.; GONÇALVES, G. T.; PÉREZ, J. A. 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>

SEIFERT, E.; SEIFERT, S.; VOGT, H.; DREW, D.; AARDT, J. V.; KUNNEKE, A. SEIFERT, T. Influence of drone altitude. Image Overlap, and optical sensor resolution on Multi-View reconstruction of Forest Images. **Remote Sensing**. V.11, p. 1-19, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11101252>

SIAFALI, E.; TSIORAS, P.A. An Innovative Approach to Surface Deformation Estimation in Forest Road and Trail Networks Using Unmanned Aerial Vehicle Real-Time Kinematic-Derived Data for Monitoring and Maintenance. **Forests**. v.15, p.1-20, 2024. <https://doi.org/10.3390/f15010212>

SLEDZ, S.; EWERTOWSKI, M.W. Evaluation of the Influence of Processing Parameters in Structure-from-Motion Software on the Quality of Digital Elevation Models and Orthomosaics in the Context of Studies on Earth Surface Dynamics. **Remote Sensing**. v.14, p.1-15, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14061312>

TOMASTIK, J.; MOKROS, M.; SALON, S.; CHUDY, F.; TUNÁK, D. Accuracy of Photogrammetric UAV-Based Point Clouds under Conditions of Partially-Open Forest Canopy. **Forests**. v.8, p.1-16, 2017. <https://doi.org/10.3390/f8050151>

TUDORAN, G.M.; DOBRE, A.C.; CICSĂ, A.; PASCU, I.S. Development of Mathematical Models for the Estimation of Dendrometric Variables Based on Unmanned Aerial Vehicle Optical Data: A Romanian Case Study. **Forests**. V.12, p.1-17, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12020200>

TÜRK, Y.; CANYURT, H. Capabilities of using UAV to determine forest roas excavation volumes in mountainous áreas. **Šumarski list**. v.142, p.139-152, 2024. <https://doi.org/10.31298/sl.148.3-4.3>

VACCA, G.; DESSI, A.; SACCO, A. 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>

XING, Z.; ZHANG, Y.; SU, C. 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. No. 10.1109/TAES.2023.3315254