

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 01/12/2025.

MARCELA DO VALLE MACHADO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE
CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE VARREDURA A LASER
EMBARCADO EM AERONAVE REMOTAMENTE
PILOTADA**



MARCELA DO VALLE MACHADO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE
CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE VARREDURA A LASER
EMBARCADO EM AERONAVE REMOTAMENTE
PILOTADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas.

Área de concentração: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio M. G. Tommaselli

M149d

Machado, Marcela do Valle

Desenvolvimento e avaliação de técnicas de calibração de um sistema de varredura a LASER embarcado em Aeronave Remotamente Pilotada / Marcela do Valle Machado. -- Presidente Prudente, 2023

123 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli

1. Sistema de Varredura a LASER (SVL). 2. Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). 3. Calibração estática. 4. Calibração em serviço. 5. Ponto de Controle Virtual (PCV). I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE VARREDURA A LASER EMBARCADO EM VARP

AUTORA: MARCELA DO VALLE MACHADO

ORIENTADOR: ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA (Participação Virtual)
Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. LAURENT POLIDORI (Participação Virtual)
Instituto de Geociências / Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. MAURICIO GALO (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Presidente Prudente, 01 de dezembro de 2023

IMPACTO ESPERADO DESTA PESQUISA¹

Esta tese apresenta um estudo de técnicas de calibração para sistemas leves de varredura a LASER embarcados em ARP, com a finalidade de minimizar fontes de erros. A calibração estática visa a determinação de parâmetros em ambiente controlado, enquanto a calibração em serviço é utilizada para validação da calibração estática.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This thesis presents a study of calibration techniques for lightweight LASER scanning systems embedded in RPA, with the purpose of minimizing sources of errors. Static calibration aims at determining parameters in a controlled environment, while on-the-job calibration is used to validate static calibration.

¹ Informação inserida de acordo com a Portaria Unesp nº 117, de 21 de dezembro de 2022.

DEDICATÓRIA

*Aos amores da minha vida,
meus filhos e meu marido, Eduardo, Murilo e Jefferson;
meus pais, Valter e Claride;
e minha irmã, Lídia.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus filhos, Eduardo e Murilo, por serem a luz da minha vida, e ao meu marido, Jefferson, pelo amor, carinho, inspiração e por ser meu principal incentivador ao longo desta árdua caminhada. À toda minha família, por acreditar em mim, em meus sonhos e ser meu alicerce em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela dedicada orientação, paciência, valiosos ensinamentos ao longo do desenvolvimento da pesquisa, e inspiração como pessoa e profissional.

À Thiago Tiedtke, pelo auxílio na montagem da nova configuração do sistema de varredura a LASER. À Anderson Arias, pela realização dos voos com o ARP. À Bruno, Weverton, Gustavo, Guilherme, Letícia Ferrari, Thaísa, Rebeca e Isabela, que auxiliaram nos trabalhos de campo, principalmente na montagem do campo de calibração.

Aos amigos do PPGCC, pelas trocas diárias tanto no âmbito profissional, quanto no pessoal. Em especial, Érika, Crislaine, Tayná, Roraí, Mari Campos, Thaísa, Letícia Ferrari, Gabriel, Lucas e Lara.

Às amigas da SCON *Geospatial*, pelo apoio emocional e incentivo em diversos cafés online. Em especial, Elisa, Carol, Pâmela, Gaby e Larissa.

À UNESP, pela infraestrutura. Aos docentes do PPGCC por todos os ensinamentos ao longo desses anos. Aos funcionários do Departamento de Cartografia, que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À banca examinadora, Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, Prof. Dr. Maurício Galo, Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita e Prof. Dr. Laurent Polidori, pelas contribuições a este trabalho de pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento do projeto UAV_4D_Bio, (processo n 2013/50426-4), em conjunto com *Academy of Finland* (processo número 273806), que possibilitou a aquisição dos principais componentes do sistema utilizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Sistemas de Varredura a LASER (SVL) embarcados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) são sistemas integrados com diferentes sensores, os quais estão sujeitos à influência de erros randômicos e sistemáticos. Técnicas de calibração são necessárias, a fim de minimizar o impacto dos erros sistemáticos na acurácia final da nuvem de pontos. Entretanto, técnicas como a calibração *in-situ* (aérea) demandam um número maior de procedimentos em campo (mais pontos de controle, maior sobreposição entre faixas, direções distintas de voo), em comparação a um campo para simples mapeamento. Neste sentido, é proposto nesta tese, o desenvolvimento e avaliação de duas técnicas de calibração, especialmente voltadas para a estimação de ângulos de *boresight*, erro provocado pelo desalinhamento angular entre os sistemas de referências dos sensores, que pode afetar consideravelmente o ajustamento entre faixas de varredura. Inicialmente é abordada a calibração aérea e o problema na identificação de entidades de controle, que afeta a determinação das coordenadas dos pontos e consequentemente, a qualidade da nuvem de varredura a LASER. Para isso, foram analisados dois modelos estocásticos e introduzida a técnica de ponto de controle virtual (PCV). A calibração terrestre estática, ou de curta distância, é apresentada como uma alternativa à calibração aérea, a fim de simplificar os procedimentos que são realizados em campo. É montado um campo de calibração em ambiente controlado, em que o SVL permanece estático, e alvos no espaço-objeto são deslocados, possibilitando uma simulação de voo. A partir desta configuração, é possível minimizar a influência de erros provenientes principalmente da posição e atitude da plataforma, uma vez que erros associados à posição são desconsiderados devido à ausência de deslocamento da plataforma, enquanto a atitude é controlada por meio de nivelamento das componentes dos acelerômetros. Na estimação dos ângulos de *boresight*, também foram utilizados e comparados dois modelos estocásticos, além das abordagens ponto-a-ponto e ponto-a-plano. A validação da calibração terrestre foi realizada com base nos resultados da calibração aérea. Em relação a técnica aérea, resultados mais evidentes foram observados com a técnica PCV, que alcançou acurácia aproximada de 0,19 m em planimetria e 0,10 m em altimetria. Em relação aos resultados da calibração terrestre, o experimento com planos de controle alcançou uma acurácia planimétrica aproximada de 0,05 m e altimétrica de 0,03 m. Conclui-se, com base nos experimentos, que a calibração terrestre apresentou grande potencial como uma alternativa às técnicas como a calibração em serviço, para sistemas de varredura a LASER embarcados em ARP, recomendando-se alguns aperfeiçoamentos.

Palavras – chave: Sistema de Varredura a LASER (SVL), Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), calibração terrestre estática, calibração em serviço, métodos estocásticos, Ponto de Controle Virtual (PCV).

ABSTRACT

Laser Scanning Systems onboard Remotely Piloted Aircraft (RPA) are integrated systems with different sensors, which are subject to the influence of random and systematic errors. Calibration techniques are necessary in order to minimize the impact of systematic errors on the final accuracy of the point cloud. However, techniques such as on-the-job calibration require a higher number of procedures in the field (more control points, high overlap between strips, and different flight directions), compared to a field for simple mapping. Therefore, this dissertation proposes the development and evaluation of two calibration techniques, especially aimed at estimating boresight angles, an error caused by angular misalignment between reference systems from different sensors, which can considerably affect the adjustment between strips. Initially, aerial calibration and the problem of identifying control entities are presented, which affects the measurement and, consequently, the quality of the point cloud. To achieve this aim, two stochastic models were analysed, and the virtual control point technique (VCP) was introduced. Static calibration is presented as an alternative to aerial calibration, in order to simplify the procedures that are carried out in the field. A calibration field is set up in a controlled environment, in which the laser scanning system remains static, and targets in the object space are moved, enabling a real flight simulation. From this configuration, it is possible to minimize the influence of errors mainly from the position and attitude of the platform, since errors associated with the position are disregarded due to the absence of platform displacement, while the attitude is controlled by means of levelling the components of accelerometers. To estimate boresight angles, two stochastic models were also used and compared, based on the point-to-point and point-to-plane approaches. Validation of the static calibration was performed based on the results of the aerial calibration. Regarding the aerial technique, more evident results were observed with the VCP technique, which achieved an accuracy of approximately 0.19 m in planimetry and 0.10 m in altimetry to the point cloud. Regarding the results of the static calibration, the experiment with control planes achieved a planimetric accuracy close to 0.05 m and altimetric accuracy of 0.03 m. It is concluded, based on the experiments, that terrestrial calibration showed high potential as an alternative to techniques such as on-the-job calibration for laser scanning systems in a RPA, with some improvements being recommended.

Keywords: Laser Scanning System, Remotely Piloted Aircraft (RPA), static terrestrial calibration, on-the-job calibration, stochastic methods, Virtual Control Point (VCP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Situações em que um SVL tem múltiplos retornos para um único pulso.	26
Figura 2.2 - Elementos relacionados à geometria de aquisição. Representação de elementos relacionados a (a) obtenção da largura da faixa de voo, (b) obtenção do <i>footprint</i> , e (c) e diferença entre IFOV e ângulo de divergência do pulso.	27
Figura 2.3 - Sistema de varredura a LASER: mecanismos e padrões de varredura.	28
Figura 2.4 - Sistemas referenciais envolvidos no modelo matemático do LASER.....	31
Figura 2.5 - Efeito circular provocado na linha de varredura, conhecido como efeito “ <i>smile</i> ”.	35
Figura 2.6 - Exemplo do efeito do erro de medida da distância.....	35
Figura 2.7 - Exemplo de discrepância entre faixas sobrepostas, causadas pelo desalinhamento angular entre sistemas.	38
Figura 2.8 - Sistemas referenciais envolvidos no modelo matemático do LASER, adaptado para a unidade Ibeo LUX.....	44
Figura 2.9 - Representação geométrica do modelo matemático do LASER, para estimação dos ângulos de boresight (matriz RB).	45
Figura 3.1 - Sistema de varredura a LASER: (a) Ibeo LUX, (b) SPAN-IGM-S1; (c) Raspberry Pi 3; (d) Payload.	51
Figura 3.2 - Mecanismo de varredura multicamada: (a) abrangência da varredura vertical em quatro níveis (vista lateral) e (b) abrangência da varredura horizontal (vista superior).	52
Figura 3.3 - Alvos trapezoidais na nuvem de pontos LASER: (a) alvos de controle trapezoidais; (b) amostra de alvo trapezoidal na nuvem de pontos (azul) e ponto de controle (vermelho); (c) alvo de controle planos e (d) e amostra alvo de controle plano na nuvem de pontos (d).....	57

Figura 3.4 - Técnica de ponto de controle virtual: (a) pontos de ápice na nuvem de pontos são gerados a partir da interseção entre planos; (b) discrepância entre ponto de ápice e vizinhos mais próximos são determinadas, e (c) pontos de controle virtuais são criados.	59
Figura 3.5 - Distribuição de pontos de controle e pontos de verificação na área de estudo para estimativa de <i>boresight</i> e controle de qualidade.....	61
Figura 3.6 - Análise dos resíduos nas coordenadas obtidos no ajustamento: Grupo 1, composto de (a) B, (b) C e Grupo 2, composto de (c) E e (d) F.	64
Figura 3.7 - Efeitos da correção dos ângulos de <i>boresight</i> : (a) nuvem de pontos sem correção, (b) desalinhamento entre faixas – fragmentos de alambrado do campo de futebol, (c) desalinhamento entre faixas – feições de edificação, (d) nuvem de pontos sem correção, (e) fragmentos de alambrado do campo de futebol corrigido e (f) feições de edificação corrigidas.	70
Figura 3.8 - Erros planimétricos de acordo com a direção das faixas de voo: (a) Experimento D (sem correção de <i>boresight</i>) e (b) experimento F (com correções).	71
Figura 3.9 - SVL leve embarcado em ARP: (a) vista superior da área de estudo e (b) vista tridimensional de fragmento de floresta.	72
Figura 4.1 – Campo de calibração: (a) estrutura estática usada como suporte e nivelamento do sistema, (b) sistema de varredura a LASER, (c) computador conectado à IMU, (d) placa móvel, (e) alvos de controle trapezoidais, (f) direção do deslocamento da placa móvel, (g) posição da antena GNSS.....	75
Figura 4.2 - Placa móvel: (a) alvos trapezoidais e (b) alvos fotogramétricos.	76
Figura 4.3 - Nivelamento do SVL: (a) nivelamento grosseiro com nível de bolha, (b) refinamento através dos parafusos de sustentação do SVL e (c) computador conectado à IMU para verificação das acelerações em tempo real.	77
Figura 4.4 - Estrutura com fio de prumo, para medição do ângulo <i>heading</i>	78

Figura 4.5 - Comparação entre abordagem ponto-a-ponto e ponto-a-plano.....	81
Figura 4.6 - Exemplo de arquivo para estimação dos ângulos de <i>boresight</i> : a) abordagem usando pontos de controle; e (b) abordagem usando parâmetros do plano de controle.....	82
Figura 4.7 - SVL montado em laboratório para determinação e análise de qualidade de distância, e definição de alvos de controle.....	86
Figura 4.8 - Análise do comportamento de dados para diferentes distâncias: (a) 0.06 m; (b) 1.5m; (c) 1.7m, e (d) 1.8 m.	87
Figura 4.9 - Nuvem de pontos preliminar: (a) vista superior; (b) vista lateral; (c) vista frontal e; (d) efeito radial observado principalmente na borda da nuvem; (e) linha de varredura referente a apenas um nível/camada e (f) efeito da discretização de tempo observado para a borda de uma linha de varredura	88
Figura 4.10 - Orientação do campo de calibração e da IMU: (a) esquema utilizado para calcular as variações angulares da placa fixa e IMU, em relação ao norte; (b) orientação esperada para a IMU; (d) orientação que foi identificada no campo de calibração.	90
Figura 4.11 - Distribuição dos pontos de ápice na nuvem de pontos.	96
Figura 4.12 - Discrepâncias planimétricas de acordo com a direção de voo: (a) Experimento D e (b) Experimento F.	101
Figura 4.13 - Configuração dos alvos de controle, distribuição de pontos e planos.	103
Figura 4.14 - Discrepância planimétrica de acordo com a direção de voo: antes da correção (azul) e após correção (amarelo).	105
Figura 4.15 - Nuvem de pontos obtida na calibração estática: (a) vista superior; e (b) vista tridimensional da nuvem de pontos	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Acurácia referente a IMUs para sistemas leves.	37
Tabela 2.2 - Exemplo de ângulos de <i>boresight</i> e respectivos desvios padrões (Torres e Tommaselli, 2018).	46
Tabela 2.3 - Parâmetros de montagem e respectivos desvios padrões (Shamseldin <i>et al.</i> , 2019).	47
Tabela 2.4 - Ângulos de <i>boresight</i> e respectivos desvios padrões (De Oliveira Júnior e Santos, 2019).	47
Tabela 2.5 - Ângulos de <i>boresight</i> (Dharmadasa <i>et al.</i> , 2022).	48
Tabela 3.1 - Características dos experimentos divididas em dois grupos.	62
Tabela 3.2 - Fator de variância <i>a posteriori</i> e média dos resíduos nas coordenadas dos pontos de controle na estimação dos ângulos de <i>boresight</i>	64
Tabela 3.3 - Ângulos de <i>boresight</i> e desvios padrão estimados.	64
Tabela 3.4 - Erros nos pontos de controle virtual sem correção com <i>boresight</i>	67
Tabela 3.5 - Controle de qualidade: precisão baseada na comparação entre faixas.	68
Tabela 3.6 - Controle de Qualidade: acurácia baseada em pontos de verificação.	70
Tabela 4.1 - Características dos experimentos divididas em três grupos.	92
Tabela 4.2 - Ângulos de <i>boresight</i> e respectivos desvios padrão estimados a partir de sistemas indicados por (1), (2) e (3), com referência a Torres e Tommaselli (2018), Shamseldin <i>et al.</i> , (2019) e De Oliveira Junior e Santos (2019), respectivamente.	95
Tabela 4.3 - Ângulos de <i>boresight</i> e respectivos desvios padrão estimados – Grupos 1 e 2. ..	95
Tabela 4.4 - Parâmetros estimados para cada plano de controle.	98
Tabela 4.5 - Ângulos de <i>boresight</i> e respectivos desvios padrão – Grupo 3.	98

Tabela 4.6 - Controle de qualidade (Grupos 1 e 2): medidas de dispersão baseadas na comparação com pontos de verificação no terreno.	100
Tabela 4.7 Análise angular por meio do cálculo de <i>Tilt</i>	101
Tabela 4.8 - Comparação de distâncias entre pontos da nuvem e planos de controle: distâncias obtidas antes (sem) e após (com) correção do desalinhamento angular.	103
Tabela 4.9- Controle de qualidade (Grupo 3): medidas de dispersão baseadas na comparação com pontos de ápice, provenientes de planos.	104
Tabela 4.10 - Análise angular por meio do cálculo de <i>Tilt</i>	104
Tabela 5.1 - Validação da calibração terrestre utilizando diferentes conjuntos de <i>boresight</i>	110
Tabela 5.2 - Ângulos de <i>boresight</i> para o caso aéreo x calibração terrestre.	110
Tabela 5.3 - Validação da calibração terrestre: acurácia baseada na comparação com pontos de controle obtidos no terreno.	112

LISTA DE SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ALS	<i>Airborne LASER Scanning</i>
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FOV	<i>Field of View</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
ICP	<i>Iterative Closest Point</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MVC	Matriz de Variância-Covariância
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
PC	Ponto de Controle
PCV	Ponto de Controle Virtual
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
PPS	<i>Pulse Per Second</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SVL	Sistema de Varredura a <i>LASER</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	MOTIVAÇÃO.....	18
1.2	HIPÓTESE DE INVESTIGAÇÃO	21
1.3	OBJETIVOS.....	22
1.4	POTENCIAL DE CONTRIBUIÇÃO	22
1.5	ESTRUTURA DA TESE	23

CAPÍTULO 2

2	SISTEMAS DE VARREDURA A LASER.....	25
2.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS DO SVL	25
2.1.1	Unidade de varredura a LASER	25
2.1.2	Sistema de posicionamento e orientação	28
2.1.3	Modelo Matemático do LASER.....	29
2.2	PRINCIPAIS FONTES DE ERROS E SEUS IMPACTOS EM NUVENS DE PONTOS.	31
2.3	MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO CONVENCIONAIS.....	39
2.4	MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO PARA SVL EMBARCADO EM ARP	43

CAPÍTULO 3

3	ESTIMATIVA INDIRETA <i>IN-SITU</i> DOS ÂNGULOS DE <i>BORESIGHT</i>.....	50
3.1	SISTEMA DE VARREDURA A LASER	50
3.2	METODOLOGIA.....	53
3.2.1	Técnicas de estimação dos ângulos de <i>boresight</i>	53
3.2.2	Ponto de Controle Virtual.....	56
3.3	EXPERIMENTOS.....	59
3.3.1	Aquisição de dados e processamento	59
3.3.2	Estimativa do boresight por MMQ e Ponto de Controle Virtual.....	61
3.3.3	Avaliação da performance da nuvem de pontos.....	65
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
3.4.1	Avaliação dos pontos de controle virtuais	67
3.4.2	Avaliação da estimativa e correção do <i>boresight</i>	67
3.5	CONCLUSÃO.....	72

CAPÍTULO 4

4	CALIBRAÇÃO TERRESTRE DE UM SISTEMA DE VARREDURA A LASER PARA ARP.....	74
4.1	METODOLOGIA.....	74
4.1.1	Campo de calibração.....	75
4.1.2	Nivelamento do sistema.....	76
4.1.3	Simulação da trajetória de voo	79
4.1.4	Abordagens para estimação dos ângulos de <i>boresight</i> pelo MMQ	79
4.2	EXPERIMENTOS.....	85
4.2.1	Aquisição de dados e processamento da nuvem de pontos	85
4.2.2	Estimação dos ângulos de <i>boresight</i> - calibração terrestre	91
4.2.2.1	<i>Abordagem ponto-a-ponto – Grupos 1 e 2</i>	92
4.2.2.2	<i>Abordagem ponto-a-plano</i>	96
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	99
4.3.1	Avaliação da abordagem ponto-a-ponto.....	99
4.3.2	Avaliação da abordagem ponto-a-plano	102
4.4	CONCLUSÃO.....	106

CAPÍTULO 5

5	AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO AÉREA E TERRESTRE.....	109
5.1	AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DOS PARÂMETROS ESTIMADOS NA CALIBRAÇÃO ESTÁTICA APLICADA A DADOS OBTIDOS PARA A CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.....	109
5.2	PERFORMANCE DA CALIBRAÇÃO – CASO AÉREO X CASO TERRESTRE	112

CAPÍTULO 6

6	CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	115
	REFERÊNCIAS	117

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento de ARPs - Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA - *Remotely Piloted Aircraft*), terminologia adotada oficialmente pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2017), como uma plataforma de mapeamento acessível, associado à miniaturização de diferentes sensores, tem possibilitado inúmeras pesquisas e aplicações nos campos da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (Nex *et al.*, 2022). Sistemas de varredura leves, compostos por unidade de varredura a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), IMU (*Inertial Measurement Unit*) e GNSS (*Global Navigation Satellite System*), integrados à ARPs, tornaram-se importantes ferramentas de aquisição de dados para representação geométrica e disponibilização de informações tridimensionais com qualidade centimétrica (Jaakkola *et al.*, 2010; Wallace *et al.*, 2012; Mandlbürger *et al.*, 2023).

A capacidade de penetrar em espaços vazios da vegetação e gravar múltiplos retornos, a partir da emissão de pulsos LASER, associada à flexibilidade e eficiência na coleta de dados tridimensionais com uma plataforma ARP, fizeram com que Sistemas de Varredura a LASER (SVL) passassem a ser utilizados de forma individual, ou em conjunto com sistemas fotogramétricos (Ravi *et al.*, 2018), em diferentes aplicações, tais como inventário florestal, agricultura de precisão, mapeamento de ambientes costeiros e construção civil (Wallace *et al.*, 2012; Jaakkola *et al.*, 2017; Elbahnasawy *et al.*, 2018; Lin *et al.* 2019; Feroz e Dabous, 2021; Aricak *et al.*, 2023). Considerando a crescente preocupação mundial acerca da sustentabilidade ambiental, que abrange a proteção de florestas e investimentos na agricultura de precisão para aumento na produção de alimentos, os SVL leves tornaram-se uma ferramenta promissora, principalmente para monitoramento e manejo de florestas e culturas agrícolas (Gebbers e Adamchuk, 2010; Jorge e Inamasu, 2014).

No entanto, devido à combinação de medidas provenientes de diferentes sensores, a acurácia final das nuvens de pontos pode ser afetada por distintas fontes de erros. Para cada componente integrante do sistema de varredura, é informada uma acurácia conforme especificações fornecidas pelo fabricante, e a combinação dos erros provenientes desses sensores pode ser propagada, impactando o erro final. Apesar de ARPs com sistemas leves

serem utilizados a uma altura menor em relação a sistemas convencionais, os efeitos dos erros não são necessariamente menores, dependendo principalmente da acurácia do sistema utilizado. Neste sentido, as diferentes fontes de erros são motivo de investigação há mais de 20 anos. Uma abordagem geral de erros em sistemas convencionais (*Airborne LASER Scanning - ALS*) foi apresentada inicialmente por Baltsavias (1999.b) e Schenk (2001), enfatizando as relações e fórmulas básicas usadas para estes sistemas e a importância de analisar cada fonte de erro, bem como a relação entre a modelagem do erro, o parâmetro recuperado e os efeitos finais nos pontos no espaço objeto.

Dentre esses erros, atenção especial deve ser dada à calibração individual de sensores, perda de sincronização de tempo e desalinhamento entre sistemas (May e Toth, 2007). Os fabricantes geralmente não informam as fontes de erro ou as circunstâncias em que a acurácia dos sensores foi determinada, o que pode influenciar na aquisição de dados (May e Toth, 2007). A sincronização de tempo entre os sensores também é um ponto importante, pois o tempo é usado para associar dados de navegação com dados de varredura a LASER, a fim de estimar as coordenadas tridimensionais do terreno. Uma alternativa para situações em que os sensores não são sincronizados em tempo real é realizar esta sincronização por pós-processamento (Machado *et al.*, 2019). A qualidade da posição obtida pelo receptor GNSS e a relação espacial entre a orientação de diferentes sistemas (IMU e unidade LASER), também podem ser reconhecidas como um processo crítico. Essa relação é composta por medidas de *lever-arm*, feitas entre as origens dos sistemas, a fim de identificar os deslocamentos espaciais entre os diferentes sistemas (também chamado de *offsets*), e por uma matriz de rotação, conhecida como matriz de *boresight*, calculada em função dos ângulos de desalinhamento entre os eixos dos sistemas. Como as medidas de *lever-arm* são geralmente obtidas de forma direta, maior atenção é dada aos ângulos de *boresight*, por serem estimados indiretamente, e os efeitos do desalinhamento angular serem proporcionais à altura de voo (May, 2008). Esses efeitos podem ser identificados principalmente em faixas de voo sobrepostas, nas quais os elementos de superfície não coincidem ao serem sobrepostos, afetando diretamente a acurácia posicional da nuvem de pontos (Kersting *et al.*, 2012.a).

No que se refere a SVL leves embarcados em ARP, a modelagem de erros pode ser mais desafiadora do que em sistemas convencionais. Dentre os fatores críticos, estão a baixa taxa de amostragem espacial e baixo número de retornos por pulso emitido pela unidade de LASER, o que afeta a identificação das entidades de controle. Além disso, a precisão do sistema de navegação costuma ser menor em sistemas leves, principalmente devido aos erros inerentes

à IMU. Os erros provenientes de fatores externos, associados à instabilidade da plataforma em condições de vento, características do terreno e do objeto também podem afetar os dados coletados. Desta forma, considerando os erros mencionados, a acurácia posicional de sistemas leves é principalmente afetada por sensores menos precisos e falhas na integração, que acometem a orientação dos sistemas. O desalinhamento angular entre os sistemas, que afeta significativamente as faixas de sobreposição, torna-se uma das principais fontes de erro a serem investigadas dentro do contexto da calibração, embora não seja a única.

Diversas abordagens de calibração foram desenvolvidas para modelar e corrigir erros sistemáticos em sistemas convencionais. Exemplos são os métodos de ajuste de faixas, que se baseiam na redução de discrepâncias entre faixas sobrepostas usando as coordenadas das nuvens de pontos (Habib *et al.*, 2010). A calibração com ênfase no sistema, por outro lado, relaciona as medidas e parâmetros do sistema com as coordenadas dos pontos terrestres através do modelo físico do sensor, considerando principalmente a natureza dos dados disponíveis, como trajetória de voo, o registro de tempo (Burman, 2000; Morin, 2002; Toth, 2002; Habib *et al.*, 2010) e dados brutos do sistema (Filin, 2003; Friess, 2006; Skaloud e Litchi, 2006; Kersting *et al.* 2012.a).

De acordo com Habib *et al.* (2010) a disponibilidade de dados brutos não é comum, mas a calibração se torna mais rigorosa, pois mais fontes de erro podem ser minimizadas durante o processo com esse tipo de dado. Esses dados são usados para determinar rigorosamente os parâmetros de montagem, especialmente os ângulos de *boresight*, estimados com observações indiretas. Os parâmetros de montagem são frequentemente estimados com o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) baseado em equações de observação linearizadas (modelo de Gauss-Legendre/ método paramétrico) (Filin, 2003; Friess, 2006; Kersting *et al.* 2012.a), ou com uma abordagem mais rigorosa (solução de Gauss-Helmert/ método combinado) (Skaloud e Litchi, 2006; May e Toth, 2007). Além disso, os métodos de calibração também podem ser associados a diferentes primitivas de controle, que podem ser pontos, linhas ou planos, sendo este último muito utilizado e em soluções comerciais (Schneider, 2009). A abordagem ponto-a-ponto (Besl e McKay, 1992) considera a distância entre pontos correspondentes, enquanto a abordagem ponto-a-plano (Chen e Medioni, 1992) compara a distância entre um ponto e um plano tangente, que geralmente é uma abordagem mais robusta. No entanto, abordagens baseadas em planos podem não ser adequadas para todos os tipos de situações práticas (Filin, 2003), exigindo superfícies planas naturais, que não são encontradas em áreas agrícolas e florestas tão facilmente, por exemplo. Nessas áreas, as técnicas baseadas

em alvos artificiais são mais comuns (Ravi *et al.*, 2018). Em relação a SVL leves, Jaakkola *et al.* (2010), Wallace *et al.* (2012) e Torres e Tommaselli (2018) utilizaram sistemas com base na unidade de varredura Ibeo LUX e abordagem usando ponto-a-ponto. Shamseldin *et al.* (2018) e De Oliveira Junior e Santos (2019) apresentaram sistemas utilizando o Velodyne VLP-16 Puck Hi-RES, com base na abordagem ponto-a-plano. No entanto, todos os sistemas têm em comum a estimativa dos parâmetros de montagem, mais especificamente os ângulos de *boresight*, como procedimento para correção de dados.

Com base na literatura, verifica-se que a calibração rigorosa ainda é pouco explorada para SVL leves embarcados em ARPs, sendo a calibração em serviço o método mais usual para determinação dos ângulos de *boresight*, a fim de corrigir o desalinhamento entre faixas sobrepostas. Além disso, dentre as primitivas utilizadas para controle, as abordagens com planos são geralmente mais eficientes, porém restritas a ambientes urbanos ou a inserção de alvos artificiais na área. No entanto, tendo-se acesso a dados brutos do sistema, os procedimentos de calibração são vantajosos para os usuários, pois simplificariam os processos posteriores, que envolvem a calibração em serviço e todos os requisitos necessários para execução do voo, sendo alguns deles, maior número de pontos de controle distribuídos em campo, maior superposição e direções distintas de voo. Neste sentido, experimentos com calibração de curta distância tornam-se uma alternativa a ser estudada.

1.2 HIPÓTESE DE INVESTIGAÇÃO

A hipótese central desta tese de doutorado considera que a calibração estática, realizada em laboratório, a partir do acesso a dados brutos do sistema, possibilita a minimização de erros: em relação à posição, pois elimina o deslocamento cinemático do sistema; em relação à atitude, ao nivelar o sistema estático por meio dos acelerômetros; e, em relação à distância e ângulos de varredura, ao utilizar uma plataforma plana para controle das medidas. Considera, ainda, que a modelagem rigorosa utilizando abordagens baseadas em pontos e planos para estimativa dos ângulos de *boresight* em ambiente controlado, permitirá melhorar a acurácia posicional da nuvem de pontos, tornando-se um procedimento alternativo à calibração em serviço.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos relacionados ao estudo da calibração, que visa melhorar a acurácia posicional de um SVL leve, embarcado em ARP, são:

Objetivo geral:

Desenvolver técnicas de determinação indireta dos ângulos de *boresight* tanto aérea quanto de curta distância (calibração estática) em ambiente controlado, para um SVL leve a ser embarcado em ARP.

Objetivos específicos:

- Montar uma estrutura física em ambiente controlado, composto por plataforma estática para acoplar o SVL e plataforma móvel para deslocar os alvos de controle, os quais serão utilizadas para a calibração do SVL;
- Executar a calibração de curta distância do SVL por meio de uma simulação de voo, a fim de minimizar as principais fontes de erros que afetam o sistema de varredura, posicionamento e orientação;
- Implementar, aplicar e avaliar dois métodos de estimação de ângulos de *boresight*, baseados no MMQ, a partir de abordagens utilizando primitivas como pontos e planos;
- Comparar a técnica de calibração estática com a técnica de calibração aérea em serviço, a fim de validar o estudo experimental.

1.4 POTENCIAL DE CONTRIBUIÇÃO

Este trabalho aborda um estudo de técnicas de estimação indireta dos ângulos de *boresight*, tanto por calibração *in-situ* (aérea) como por uma técnica de calibração rigorosa denominada calibração estática (terrestre ou de curta distância). Para a calibração estática do SVL leve, a ser realizada em laboratório, é proposta uma simulação de voo, utilizando o deslocamento de alvos do espaço-objeto e mantendo estático o SVL, a fim de minimizar erros provenientes do posicionamento e atitude da plataforma, bem como das medidas de distância e desalinhamento angular entre os sistemas. O procedimento requer o nivelamento da plataforma estática para controlar erros de atitude e é feito por meio dos acelerômetros, possibilitando

desprezar os movimentos de rotação da plataforma. São aplicados para estimar ângulos de *boresight*, o modelo paramétrico, bem como o modelo combinado, utilizando diferentes pesos para variáveis como ângulos, distância e coordenadas de pontos de controle, que afetam indiretamente os parâmetros. Os erros de medição de ângulos de varredura e pontos de controle geralmente não são considerados em procedimentos de calibração de sistemas leves sendo interessante analisar os efeitos do uso de métodos de estimação mais rigorosos como o modelo combinado em comparação com soluções simplificadas. As abordagens usando ponto-a-ponto e ponto-a-plano, são analisadas neste trabalho. Uma técnica de ponto de controle virtual é usada para minimizar os erros de medição da abordagem ponto-a-ponto, uma vez que algumas aplicações, como agrícolas e florestais, exigem pontos de controle sinalizados. Para fins experimentais, a validação da calibração estática é proposta com voo do sistema acoplado em ARP, em área com fragmentos de floresta, a fim de avaliar a técnica e o uso do sistema para aplicações florestais. Resultados da calibração em serviço são utilizados para comparação e análise da viabilidade da calibração estática

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese é composta por seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução sobre o tema de pesquisa, a motivação para realizá-la, a hipótese, bem como os objetivos a serem alcançados.

O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão sobre sistemas de varredura a LASER aerotransportados, principais fontes de erros que afetam sua acurácia, métodos para calibração de sistemas aerotransportados convencionais, e métodos de calibração utilizados em SVL sistemas leves embarcados em ARP.

O Capítulo 3 trata da determinação dinâmica de ângulos de *boresight* para um SVL embarcado em ARP, em que os dados são obtidos com o SVL em campo, sendo utilizado o procedimento de calibração em serviço. A estimativa do desalinhamento angular é feita com base em dois métodos de ajustamento e na técnica de pontos de controle virtuais. Os parâmetros e resultados obtidos neste capítulo são utilizados para fins de comparação com a calibração estática. É também apresentado o SVL leve desenvolvido pelo Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da FCT/Unesp e parceiros.

O Capítulo 4 descreve os experimentos com a calibração estática. É apresentada a montagem do campo de calibração, a aquisição e processamento dos dados, e determinação do

desalinhamento angular com base em dois métodos estocásticos e duas abordagens (ponto-a-ponto e ponto-a-plano).

No Capítulo 5 é apresentada uma discussão acerca da validação da calibração terrestre estática, bem como uma discussão geral da performance obtida com ambas as calibrações aérea e terrestre. O Capítulo 6 traz as considerações finais sobre a pesquisa, bem como recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, foi apresentado um estudo experimental de calibração terrestre estática para sistemas de varredura a LASER leves embarcados em ARP, como alternativa às técnicas convencionais, tais como calibração em serviço (calibração aérea). O principal erro investigado foi o desalinhamento angular entre os sistemas, estimado indiretamente por duas técnicas de calibração (aérea e terrestre), bem como modelos de estimação e primitivas distintas. Para fins de validação, foram utilizados dados de referência de uma calibração aérea.

Inicialmente foi feita uma coleta de dados com o SVL embarcado em ARP, a fim de gerar uma nuvem de pontos e estimar os parâmetros de montagem utilizados como referência, especialmente os ângulos de *boresight*. Para esse trabalho, se destacam como pontos positivos: a aplicação de uma técnica de estimação de parâmetros (método combinado) mais completa, que relaciona parâmetros e observações e considera diferentes fontes de erros; o desempenho da técnica promissora de Pontos de Controle Virtuais, que viabiliza o uso da abordagem ponto-a-ponto com maior confiabilidade, principalmente em área de floresta e agricultura; e correção eficiente da nuvem de pontos, a partir do conjunto de ângulos de *boresight* estimado. Como limitações, são identificadas: a necessidade de alvos especiais ou superfícies planas; o número mínimo de pontos para calibração; o conhecimento dos dados brutos e erros internos dos ângulos de varredura, geralmente não informado pelo fabricante; e as limitações da própria unidade LASER quanto a aquisição de pontos.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se: avaliar PCVs em nuvens de pontos com maior densidade e aplicá-lo em todo o conjunto de pontos; experimentos com unidades de varredura a LASER mais precisas e que possibilite uma análise mais rigorosa, a partir de ambos os métodos de estimação; cálculo da correlação entre ângulos de varredura e ângulos de *boresight*, a partir do método combinado e comparações entre nuvens de varredura a LASER e fotogramétricas, a fim de avaliar a qualidade da nuvem LASER. Experimentos também devem considerar o uso desta técnica com outras feições e abordagens, como linhas ou planos, e comparação com estratégias de calibração existentes.

Em relação à calibração terrestre, foi montada uma estrutura em ambiente controlado para aquisição de dados com o SVL. Após processamento e análise dos dados, foi demonstrado que o método proposto alcançou o objetivo de estimar parâmetros de montagem

para correção de nuvem de pontos em ambiente controlado. Como pontos positivos desta técnica, tem-se: a montagem de uma estrutura de calibração em ambiente controlado que reduz sensivelmente os erros relacionadas à posição e atitude da plataforma; opção de calibração para sistemas utilizados em aplicações florestais e de agricultura, em que é difícil encontrar feições retas ou planas para usar na calibração em serviço; e utilização da técnica de PCV. Como limitações do método, tem-se: o *design* da estrutura de calibração, que não foi posicionado a uma distância suficiente para minimizar o efeito da discretização de tempo nos dados, ocasionando a geração de uma nuvem ruidosa, que afetou a extração de primitivas como pontos, linhas ou planos; a medição do ângulo *heading*, crítico para determinação precisa em ambiente estático e a necessidade de pontos ou feições de controle. Em relação ao aspecto prático, o *design* da estrutura desenvolvido nesta pesquisa demandou esforços para a execução e coleta de dados, mas ressalta-se que é uma das formas de testar a metodologia, podendo ser executado a partir de outras configurações de montagem e execução.

Como recomendações para trabalhos futuros, é sugerido: o uso de uma unidade LASER mais precisa, em que se tenha uma maior precisão na medida de distância; a montagem da unidade LASER na horizontal, de forma que sejam testadas experimentalmente distâncias maiores (a partir de 8 m) e que mostrem o efeito dos ângulos de *boresight* na correção da nuvem, uma vez que o erro nos pontos da nuvem devem ser menores que o efeitos dos ângulos, a fim de que possa ser possível estima-los; aquisição de dados em diferentes direções, gerando mais de uma faixa de varredura, especialmente, cruzadas, a fim de haver redundância de informações; novas soluções para determinar o ângulo *heading* e aplicação e avaliação do sistema de ângulos *Tilt*, *Swing* e *Azimuth* (T,S,A) como opção aos ângulos de Euler, *Ômega*, *fi* e *Kappa*; calibração terrestre, no mesmo dia da aquisição de dados aéreos; tratar a posição da plataforma como observação, o que não foi realizado nos experimentos deste trabalho, por considerar que a calibração era estática, e portanto, isenta destes erros.

Com base nos experimentos deste trabalho, a técnica de calibração terrestre estática requer aperfeiçoamentos, mas é promissora e apresenta potencial para ser utilizada como uma alternativa a outras técnicas de calibração, sendo uma contribuição importante para os usuários da comunidade de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto.

REFERÊNCIAS

- ANAC, B. **Orientações para Usuários de Drones**, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/orientacoes_para_usuarios.pdf
- ARICAK, B.; WING, M.G.; AKAY, A. E. State of the Art on Airborne LiDAR Applications in the Field of Forest Engineering. **Concepts and Applications of Remote Sensing in Forestry**, p. 257-369, 2023.
- BALTSAVIAS, E.P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing**, v. 54, n. 2, p. 164–198, 1999.a.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2–3, p. 199–214, 1999.b.
- BANG, K. **Alternative methodologies for LiDAR system calibration**. Tese de Doutorado. University of Calgary, Calgary, 2010.
- BAUMKER, M.; HEIMES, F. J. New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System. **Proceedings: European Organization for Experimental Photogrammetric Research-OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation**. Hannover: Institute for Photogrammetry and GeoInformation (IPI), University of Hannover, p. 1-17, 2001.
- BESL, P. J.; MCKAY, N. D. Method for registration of 3-D shapes. **Sensor fusion IV: control paradigms and data structures**, v. 1611, p. 586-606, 1992.
- BURMAN, H., **Calibration and Orientation of Airborne Image and LASER Scanner Data Using GPS and INS**. Doctoral thesis. Institutionen för geodesi och fotogrammetri, Stockholm, Sweden, 2000, 125.p
- CAUSA, F., ASCIOLLA, M., OPROMOLLA, R., MOLINA, P., MENNELLA, A., NISI, M., FASANO, G. UAV-based LiDAR Mapping with Galileo-GPS PPP Processing and Cooperative Navigation. **In 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)**, p. 938-947, 2022.
- CHEN, Y.; MEDIONI, G. Object modelling by registration of multiple range images. **Image and vision computing**, v. 10, n. 3, p. 145-155, 1992.
- COLOMINA, I. Modern sensor orientation technologies and procedures. **Test Report and Workshop Proceedings**, Official Publication, p. 59-70, 2002.
- DE OLIVEIRA JUNIOR, E. M.; DOS SANTOS, D. R. Rigorous Calibration of UAV-Based LiDAR Systems with Refinement of the Boresight Angles Using a Point-to-Plane Approach. **Sensors**, v. 19, n. 23, p. 5224, 2019.

DHARMADASA, V.; KINNARD, C.; BARAËR, M. An accuracy assessment of snow depth measurements in agro-forested environments by UAV lidar. **Remote Sensing**, v. 14, n. 7, p. 1649, 2022.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation and Applications**, Norwood, Massachusetts: Artech House, 2005, 257 p.

ELBAHNASAWY, M.; SHAMSELDIN, T.; RAVI, R.; ZHOU, T.; LIN, Y. J.; MASJEDI, A.; HABIB, A. Multi-sensor integration onboard a UAV-based mobile mapping system for agricultural management. **IGARSS 2018- IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 3412-3415, 2018.

FEROZ, S.; ABU DABOUS, S. Uav-based remote sensing applications for bridge condition assessment. **Remote Sensing**, v. 13, n. 9, p. 1809, 2021.

FILIN, S. Recovery of Systematic Biases in LASER Altimetry Data Using Natural Surfaces. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 69, n. 11, p. 1235-1242, 2003.

FRIESS, P. Toward a rigorous methodology for airborne LASER mapping. **Proceedings EuroCOW**, p. 25-27, 2006.

GALO, M. **Notas de aula – Fotogrametria III**. Departamento de Cartografia. FCT – Unesp, Presidente Prudente – SP, 2019.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 2015, 319 p.

GEODETICS, I. **LiDARTool™ User Manual**, v.1, Documento 20149, Geodetics, Inc.: San Diego, CA, USA, 2019.

GLENNIE, C. L.; KUSARI, A.; FACCHIN, A. Calibration and stability analysis of the VLP-16 Laser Scanner. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 9, p. 55-60, 2016.

GLIRA, P.; PFEIFER, N.; MANDLBURGER, G. Rigorous Strip Adjustment of UAV-based Laser scanning Data Including Time- Dependent Correction of Trajectory Errors. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 82, n. 12, p. 945–954, 2016.

HABIB, A.; BANG, K. I.; KERSTING, A. P.; CHOW, J. Alternative methodologies for LiDAR system calibration. **Remote Sensing**, v. 2, n. 3, p. 874-907, 2010.

HABIB, A.; BANG, K. I.; KERSTING, A. P.; LEE, D.C. Error budget of LiDAR systems and quality control of the derived data, **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 75, n. 9, p. 1093-1108, 2009.

- HABIB, A.; RENS, J. Quality assurance and quality control of LIDAR systems and derived data. **Advanced LIDAR Workshop**, University of Northern Iowa, 2007.
- HUISING, E. J.; PEREIRA, L.M.G. Errors and accuracy estimates of LASER data acquired by various LASER scanning systems for topographic applications. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 53, n. 5, p. 245-261, 1998.
- IBEO AUTOMOTIVE. **Ibeo LUX 2010 Laserscanner Operating Manual**, Ibeo Automobile Sensor GmbH, 2010.
- JAAKKOLA, A.; HYYPPA, J.; KUKKO, A.; YU, X.; KAARTINEN, H.; LEHTOMALI, M.; LIN, Y. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 6, p. 514–522, 2010.
- JORGE, L.A.C.; INAMASU, R.Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. **Agricultura de Precisão. Resultados de um Novo Olhar**, Embrapa, 2014.
- KERSTING, A. P. **Quality assurance of multi-sensor systems**. Tese de Doutorado, University of Calgary, Calgary, 2011.
- KERSTING, A. P.; HABIB, A.; BANG, K. I.; SKALOUD, J. Automated approach for rigorous light detection and ranging system calibration without preprocessing and strict terrain coverage requirements. **Optical Engineering**, v. 51, n. 7, p. 76201, 2012.a.
- KERSTING, A.P.; HABIB, A. A comparative analysis between rigorous and approximate approaches for LiDAR system calibration. **Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography**, v. 30, n. 62, p. 593-605, 2012.b.
- KOSKA, B. Bore-sights and Lever-arms Determination of Sensors Mounted on Autonomous Mapping Airship. **Proceedings of 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM**. p. 579 - 586, 2013.
- KUKKO, A. **Road environment mapper—3D data capturing with mobile mapping**. Tese de Doutorado. Helsinki University of Technology, Espoo, 2009, 158 p.
- LI, J.; YANG, B.; CHEN, C.; WU, W.; ZHANG, L. Aerial-triangulation aided *boresight* calibration for a low-cost UAV-LiDAR system. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 1, p. 245-252, 2020.
- LIN, Y. C.; CHENG, Y. T.; ZHOU, T.; RAVI, R.; HASHEMINASAB, S. M.; FLATT, J. E.; HABIB, A. Evaluation of UAV LiDAR for mapping coastal environments. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p. 2893, 2019.
- LIU, Z.; ZHANG, F.; HONG, X. Low-Cost Retina Like Robotic Lidars Based on Incommensurable Scanning. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 27, n. 1, p. 58–68, 2022.

MACHADO, M. D. V.; TOMMASELLI, A. M. G.; TORRES, F. M.; CAMPOS, M. B. Postprocessing Synchronization of a Laser Scanning System Aboard a UAV. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 85, n. 10, p. 753-763, 2019.

MANDLBURGER, G.; KÖLLE, M.; PÖPPL, F.; CRAMER, M. Evaluation of Consumer-Grade and Survey-Grade UAV-Lidar. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 48, p. 99-106, 2023.

MAY, N. C. **A rigorous approach to comprehensive performance analysis of state-of-the-art airborne mobile mapping systems**. Tese de Doutorado. The Ohio State University, Ohio. 2008.

MAY, N. C.; TOTH, C. K. Point Positioning Accuracy of Airborne LiDAR Systems: A Rigorous Analysis. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 3/W49B, p. 19-21, 2007.

MORIN, K. W. **Calibration of Airborne Laser Scanners**. Tese de Doutorado. University of Calgary, Calgary, 2002.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. Editora Unesp, 2007, 480 p.

NEX, F., ARMENAKIS, C., CRAMER, M., CUCCI, D. A., GERKE, M., HONKAVAARA, E., KUKKO, A., PERSELLO, C.; SKALoud, J. UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 184, 215-242, 2022.

NOVATEL Inc. **SPAN-IGM-S1 Product Sheet**. v. 3, 2014. Disponível em: <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Manuals/OM-20000141/OM-20000141.pdf>

OJOATRE, S., ZHANG, C., HUSSIN, Y. A., KLOOSTERMAN, H. E., ISMAIL, M. H. Assessing the uncertainty of tree height and aboveground biomass from terrestrial laser scanner and hypsometer using airborne LiDAR data in tropical rainforests. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, 12(10), 4149-4159, 2019

OUSTER. **OS1 hardware User Manual**, 2023. Disponível em: <https://data.ouster.io/downloads/hardware-user-manual/hardware-user-manual-rev7-os1.pdf>

PEDLEY, M. Tilt sensing using a three-axis accelerometer. **Freescale semiconductor application note**, v1, 2013.

PFEIFER, N.; BRIESE, C. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 3/W52, p. 311–319, 2007.

RAVI, R.; LIN, Y.; ELBAHNASAWY, M.; SHAMSELDIN, T.; HABIB, A. Simultaneous system calibration of a multi-lidar multicamera mobile mapping platform. **IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing**, v. 11, n. 5, p. 1694-1714, 2018.

RIEGL. **RIEGL Laser Scanning Software**, 2022. Disponível em: https://www.laser-3d.pl/wp-content/uploads/RiMTA_DataSheet_2020-07-22.pdf

SANTOS, R.C. **Extração e regularização de contornos de telhados de edificações a partir de dados LiDAR usando o algoritmo alpha-shape e CD-Spline**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2019.

SCHENK, T. Modeling and recovering systematic errors in airborne laser scanners. **Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models**, Estocolmo, Suécia, 2001.

SCHNEIDER, D. Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38, p. 177-182, 2009.

SHAMSELDIN, T.; RAVI, R.; ELBAHNASAWY, M.; LIN, Y. J.; HABIB, A. Impact Analysis and Calibration of UAV-Based Mobile Lidar System. **IGARSS IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 8769-8772, 2018.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, 2018, 637 p.

SKALLOUD, J.; LICHTI, D. Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne LASER scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 61, n. 1, p. 47 - 59, 2006.

SKALLOUD, J.; SCHWARZ, K. P. Accurate Orientation for Airborne Mapping Systems, **Symposium on Data Integration: Systems and Techniques**, Cambridge, UK, p. 13 - 17, 1998.

TORRES, F. M., TOMMASELLI, A. M. G. A lightweight UAV-Based LASER scanning system for forest application, **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 24, n. 3, p. 318-334, 2018.

TORRES, F.M. **Montagem e avaliação de um sistema de varredura a LASER embarcado em VANT**. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016.

TOTH, C. K. Calibrating airborne lidar systems. **Proc. ISPRS Commission II Symposium**, p. 475 - 480, 2002.

VOSSelman, G.; MAAS, H. G. **Airborne and terrestrial laser scanning**, Whittles Publishing, Dunbeath, Caithness, 2010, 442 p.

WALLACE, L., LUCIEER, A.; WATSON, C., TURNER, D. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory, **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1519-1543, 2012.

WELLS, D. E., KRAKIWSKY, E. J. **The method of least squares**. Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canadá, 1971.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning-an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 68–82, 1999.

WOLF. P. R.; DEWITT. B. A. **Elements of Photogrammetry: with application in GIS**. India: McGraw-Hill, 1983, 3ª Ed. 608 p.

WOODMAN, O. J. **An introduction to inertial navigation**. Tese de Doutorado, University of Cambridge, Cambridge, 2007.

DADOS CURRICULARES

MARCELA DO VALLE MACHADO	
Data de nascimento:	23/01/1991
Naturalidade:	Valença - Rio de Janeiro - Brasil
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2010 - 2015	Graduação em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ
2016 - 2018	Mestrado em Ciências Cartográficas Universidade Estadual Paulista - FCT/UNESP
2018 - 2023	Doutorado em Ciências Cartográficas Universidade Estadual Paulista - FCT/UNESP
Curriculo Lattes:	http://lattes.cnpq.br/6942536833066252
ORCID:	https://orcid.org/0000-0002-1162-245X
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
MACHADO, M. V. ; TOMMASELLI, A. M. G. . UAV-LIDAR boresight estimation using virtual control points: a case study. ISPRS ANNALS OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES , v. X-1/W1-2023, p. 1073-1080, 2023.	
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS	
GALO, M.; PUGLIESI, E. A.; MACHADO, M. V.. Participação em banca de BOAVENTURA, D.; PARANGABA,G.; NASCIMENTO, I.; FREITAS, L.. MAPEAMENTO DE PARTE DA ÁREA URBANA DE PRESIDENTE PRUDENTE NA ESCALA 1:1.000, COM GSD DE 12 cm: FOLHA SF-22-Y-B-III-1-NO-F-III-6-C. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2021.	
PUGLIESI, E. A.; SOUZA, G. H. B.; MACHADO, M. V.. Participação em banca de SANTOS, C.Q.; DIAS, R.A.. MAPEAMENTO PLANIALTIMÉTRICO DA CIDADE DE INDIANA / SP, EM ESCALA 1:1.000. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2021.	