

CÉSAR FRANCISCO DE PAULA

**Batimetria *multi-media* aplicada a reservatórios de água no Brasil:
validação da técnica e aplicabilidade**

São Paulo
2024

CÉSAR FRANCISCO DE PAULA

**Batimetria *multi-media* aplicada a reservatórios de água no Brasil:
validação da técnica e aplicabilidade**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes

Orientador: Professor Livre-Docente Jorge
Pimentel Cintra

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de janeiro de 2024

Assinatura do autor: César Francisco de Paula

Assinatura do orientador: Jorge P. Cintra

Catálogo-na-publicação

de Paula, César Francisco

Batimetria *multi-media* aplicada a reservatórios de água no Brasil: validação da técnica e aplicabilidade / C. F. de Paula -- versão corr. -- São Paulo, 2024.

177 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Batimetria Óptica 2. Batimetria multi-media 3. Topografia
4. Aerofotogrametria 5. Reflexão Especular I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

Nome: DE PAULA, César Franciso

Título: Batimetria *multi-media* aplicada a reservatórios de água no Brasil:
validação da técnica e aplicabilidade

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Doutor em Ciências.

Aprovado em: ___/___/_____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Dedico este trabalho as duas pessoas mais importantes de minha vida aos quais sem eles não estaria aqui: minha Mãe Marina e meu Pai José (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero expressar minha profunda gratidão a Deus, pois Ele é minha fonte de inspiração diária e a razão pela qual estou aqui. Sua graça e orientação têm sido fundamentais em minha jornada até este momento.

Ao meu estimado orientador, Professor Dr. Jorge Pimentel Cintra, gostaria de expressar minha sincera apreciação por sua dedicação contínua à minha pesquisa. Sua orientação, valiosas ideias, motivação incansável e apoio inabalável foram cruciais para alcançar este feito acadêmico.

Minha família merece um agradecimento especial por seu apoio incondicional nos momentos mais desafiadores. Mesmo quando tudo parecia perdido, vocês estiveram ao meu lado, e por isso, minha gratidão é eterna.

Aos meus amigos, cuja lista seria longa demais para mencionar individualmente, dedico esta tese a todos vocês. Obrigado por acreditarem em meu potencial, compreenderem minhas ausências e celebrarem cada conquista comigo. Sem o apoio de vocês, esta jornada teria sido muito mais árdua.

Os resultados desta tese foram possíveis graças ao importante suporte técnico e financeiro de empresas, órgãos e instituições de pesquisa. À empresa Fototerra, em particular ao Diretor Técnico Luís Antônio de Lima, estendo meus sinceros agradecimentos. Além de apoiar minha jornada acadêmica, gentilmente concederam a autorização para o voo aerofotogramétrico, que foi fundamental para as imagens aéreas desta pesquisa.

Gostaria de expressar minha imensa gratidão ao Instituto de Fotogrametria da Universidade de Stuttgart e à Universidade de Viena, e aos professores Dr. Uwe Sörgel e Dr. Gottfried Mandlbürger, por me convidarem a realizar um estágio de pesquisa na Alemanha. Isso me permitiu mergulhar no fascinante mundo da batimetria por imagens e conquistar novas amizades ao longo dessa jornada.

Não posso deixar de mencionar a importância do apoio financeiro concedido pela CAPES, por meio da concessão da bolsa de pesquisa na modalidade PDSE. Essa bolsa tornou possível a realização de um dos meus maiores sonhos acadêmicos.

Por fim, dedico esta tese não apenas a todos mencionados neste agradecimento, mas também a todos aqueles que, de alguma forma e em algum momento, contribuíram para este trabalho. O sucesso desta pesquisa é fruto de um esforço coletivo, e estou profundamente grato a todos que fizeram parte dessa jornada.

“Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ela lança toda a força de sua alma, todo universo conspira a seu favor.”

(Johann Wolfgang Von Goeth)

RESUMO

O conhecimento da topografia submersa e sua variação ao longo do tempo é de vital importância em aplicações práticas e científicas. A batimetria convencional é a técnica mais utilizada para mapear o fundo dos corpos d'água e apresenta limitações consideráveis, especialmente em águas rasas por conta de que o barco não consegue navegar, além de demandar um maior tempo para coletar dados em extensas áreas. O sensor LiDAR batimétrico pode ser empregado para mapear o fundo topográfico, porém, devido ao seu alto custo não são encontrados no mundo muitos equipamentos em atividade. Com ele tem-se uma grande produtividade de coleta da informação em maiores profundidades (~70 m). Sua eficácia está condicionada por algumas características do corpo d'água, como turbidez, partículas em suspensão e salinidade, sendo esta última particularmente relevante em ambientes marinhos. Emergindo como uma alternativa promissora, a batimetria óptica oferece uma solução eficaz para se obter modelos topográficos em águas rasas e com baixa turbidez. A qualidade altimétrica dos modelos derivados das técnicas existentes (batimetria *multi-media*¹ e multiespectral) é impactada por algumas variáveis, dentre as quais merece destaque a reflexão especular (*sun-glint*). Esta tese de doutorado, além da pesquisa teórica, introduz a aplicação da batimetria *multi-media* no reservatório de Cachoeira, gerido pela SABESP (SP/Brasil). Como estratégias inovadoras, foi utilizado um algoritmo para correção/atenuação do efeito *sun-glint* em imagens aéreas e posterior geração da nuvem de pontos fotogramétrica através da correlação de imagens para a região do corpo d'água. Outra novidade é a identificação do algoritmo *Feature Based Matching* (FBM) como mais eficaz na correlação de *pixels* em regiões de corpo d'água, gerando uma nuvem de pontos fotogramétrica com menos ruídos, ideal para a aplicação da batimetria *multi-media*. Os resultados e conclusões desta pesquisa foram positivos e satisfatórios. O modelo batimétrico gerado apresentou qualidade altimétrica padrão PEC-B, na escala 1:2.000, para profundidades de até 3,00 metros quando comparado com dados de *single-beam*. Este modelo, a um custo relativamente menor e mais rápido de ser obter, quando comparado com a batimetria convencional, pode servir como referência da topografia submersa em regiões carentes de estudos do fundo topográfico submerso, suprimindo lacunas de informação, especialmente em zonas de transição entre as porções terrestres e o corpo d'água, onde as técnicas convencionais deixam um vazio de informação nestas regiões.

Palavras-chave: Batimetria Óptica, Batimetria *Multi-media*, Reflexão Especular, Modelagem 3D em reservatórios de água.

¹ *Multi-media* é o nome original (em inglês) da técnica de batimetria utilizada. A tradução deste termo para o Português é batimetria multi-meio

ABSTRACT

Understanding the submerged topography and its variation over time is of vital importance in practical and scientific applications. Conventional bathymetry is the most widely used technique to map the bottom of water bodies and presents considerable limitations, especially in shallow waters where boats cannot navigate, and also requires more time to collect data in large areas. The bathymetric LiDAR sensor can be used to map the topographic bottom, however, due to its high cost, not many such devices are active around the world. With it, a high productivity of data collection is achieved at greater depths (~70 m). Its effectiveness is conditioned by some characteristics of the water body, such as turbidity, suspended particles, and salinity, the latter being particularly relevant in marine environments. Emerging as a promising alternative, optical bathymetry offers an effective solution for obtaining topographic models in shallow waters with low turbidity. The altimetric quality of models derived from existing techniques (multi-media bathymetry and multispectral) is impacted by some variables, among which specular reflection (sun-glint) deserves special attention. This doctoral thesis, in addition to theoretical research, introduces the application of multi-media bathymetry in the Cachoeira reservoir, managed by SABESP (SP/Brazil). As innovative strategies, an algorithm was used for the correction/mitigation of the sun-glint effect in aerial images and the subsequent generation of the photogrammetric point cloud through image matching for the water body region. Another novelty is the identification of the Feature Based Matching (FBM) algorithm as more effective in correlating pixels in water body regions, generating a photogrammetric point cloud with less noise, ideal for the application of multi-media bathymetry. The results and conclusions of this research were positive and satisfactory. The generated bathymetric model presented standard PEC-B altimetric quality, on the 1:2.000 scale, for depths of up to 3.00 meters when compared to single-beam data. This model, at a relatively lower cost and faster to obtain compared to conventional bathymetry, can serve as a reference for the submerged topography in regions lacking studies of the submerged topographic bottom, filling information gaps, especially in transition zones between land portions and the water body, where conventional techniques leave an information void in these areas.

Keywords: Optical Bathymetry, Multi-media Bathymetry, Specular Reflection, 3D Modeling water reservoirs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Offsets</i> entre o centro de gravidade da embarcação e os equipamentos: GNSS e SONAR	27
Figura 2 - Propagação de uma onda acústica na água	28
Figura 3 - Influência das ondas na superfície na aquisição da informação por um pulso acústico	30
Figura 4 - Projeção dos <i>footprints</i> acústicos em relação ao ângulo de incidência	31
Figura 5 - Esquema gráfico ilustrando o recobrimento batimétrico do relevo submerso utilizando o SONAR de feixe único (A), SONAR de varredura lateral (B) e SONAR de múltiplos feixes (C)	33
Figura 6 - Esquema da montagem dos transdutores (emissão e recepção) integrantes de SONAR interferométrico, acoplados em uma plataforma autônoma AUV. Emissão (feixe em vermelho) e Recepção (feixes em azul e verde)	34
Figura 7 - Desempenho da produtividade na aquisição da informação da topografia submersa utilizando o ALB e o SONAR	36
Figura 8 - Utilização do disco <i>sechhi</i> na avaliação da turbidez da água	37
Figura 9 - Esquema gráfico de operação do sistema LiDAR batimétrico com a operação conjunta dos laser verde e topográfico	38
Figura 10 - Trajetória percorrida pelo pulso verde desde sua emissão até as reflexões ocorridas no fundo topográfico	40
Figura 11 - Decomposição da radiação eletromagnética em ondas espectrais	44
Figura 12 - Esquema gráfico de registro da informação da superfície terrestre pelo CCD linear	45
Figura 13 - Estereopar fotogramétrico com correlação de imagens realizado sobre um corpo d'água. Os pontos gerados são utilizados para descrever a correção dos deslocamentos aparentes nas coordenadas X, Y, Z	49
Figura 14 - Geometria envolvida na batimetria <i>multi-media</i> descrita para um ponto submerso visto em duas imagens (estereopar)	50
Figura 15 - Geometria de um ponto fotogramétrico no relevo submerso analisado na direção do voo (caso 1)	52
Figura 16 - Apresentação das variáveis a' e a'' na geometria envolvida no caso 1	54
Figura 17 - Geometria de um ponto fotogramétrico no relevo submerso com localização na direção perpendicular ao voo (caso 2)	55
Figura 18 – Exemplo da ocorrência do efeito <i>sun-glint</i> em um corpo d'água formando um caminho cintilante	62

Figura 19 - Caminhos percorridos pela radiância incidente em corpos d'água antes de serem registradas pelo sensor	63
Figura 20 - Croqui de localização do reservatório de Cachoeira, área de estudo da tese	69
Figura 21 - Esquema da localização, disposição e interligação das represas integrantes do Sistema Cantareira	70
Figura 22 - Fluxograma metodológico da pesquisa	71
Figura 23 - Receptor GNSS instalado nas proximidades do hangar da empresa Fototerra em Bragança Paulista como base de apoio ao voo fotogramétrico	74
Figura 24 - Parte do arquivo da trajetória de voo contendo as coordenadas dos centros perspectivos de cada imagem bem como suas respectivas orientações	76
Figura 25 - Planejamento dos pontos de controle fotogramétrico e de verificação	77
Figura 26 - Exemplo de avaliação e releitura dos pontos de apoio suplementar nas imagens	80
Figura 27 - Resíduos finais para os pontos de apoio suplementar do tipo HV utilizados na aerotriangulação	82
Figura 28 - Resíduos finais para os pontos de apoio suplementar do tipo CK utilizados na aerotriangulação	82
Figura 29 - Processo de geração do MDE a partir das imagens fotogramétricas. (a) pirâmide de imagens nas diferentes resoluções. (b) pontos homólogos nas imagens nos diferentes níveis da pirâmide. (c) MDE gerado a partir dos pontos homólogos encontrado	85
Figura 30 - Ortomosaico gerado com as imagens tomadas para o reservatório de Cachoeira, com destaque em uma região contendo o efeito <i>sun-glint</i>	88
Figura 31 - Influência do efeito <i>sun-glint</i> na geração do MDE batimétrico, notando-se claramente esse efeito (ilhas) através do traçado de um perfil ao longo da linha vermelha indicada no ortomosaico do reservatório	89
Figura 32 - Imagens multiespectrais tomadas para o reservatório de Cachoeira onde em A tem-se a imagem original contendo o <i>sun-glint</i> e em B a imagem corrigida. Nas duas figuras as setas vermelhas indicam as regiões afetadas pelo <i>sun-glint</i> (A) e corrigida (B).	90
Figura 33 - Perfis longitudinais gerados a partir dos MDE obtidos com a correlação de imagens utilizando as imagens originais (vermelho) e imagens corrigidas (verde). O nível d'água para o dia da tomada das imagens é representado na cor azul	91
Figura 34 - Ortomosaico gerado com as imagens RGB com o <i>sun-glint</i> corrigido/minimizado	92
Figura 35 - Nuvem de pontos fotogramétrica utilizada no módulo <i>Snellius</i> para correção da refração da luz para os pontos representativos do corpo d'água	94
Figura 36 - Lâmina d'água do reservatório de Cachoeira a ser utilizado como dado de insumo no <i>Snellius</i>	95

Figura 37 - Exemplo de um arquivo de orientação exterior (para um par de imagens) utilizado no módulo <i>Snellius</i>	96
Figura 38 - Perfis longitudinal (linha amarela) gerados considerando a nuvem de pontos fotogramétrica original (verde escuro) e os pontos fotogramétricos corrigidos pelos <i>Snellius</i> (laranja).....	97
Figura 39 - Histograma e resumo estatístico gerado pelo <i>Snellius</i> após a correção da refração da luz para a componente altimétrica (Z)	98
Figura 40 - MDE interpolado por meio da batimetria <i>multi-media</i> que será avaliado em conjunto com os dados da batimetria convencional por <i>single-beam</i>	99
Figura 41 - Linhas de batimetria convencional planejadas para serem realizadas no corpo d'água do reservatório de Cachoeira. As linhas amarelas correspondem as seções batimétricas planejadas e o polígono branco o limite do corpo d'água do reservatório	101
Figura 42 - Barco de alumínio do tipo voadeira, de propriedade da SABESP, utilizado na coleta de dados utilizando <i>single-beam</i>	102
Figura 43 - Montagem do bastão contendo a antena GNSS na parte superior acoplado na embarcação	103
Figura 44 - <i>Single-beam</i> modelo Bathy-500MF (<i>Ocean Data</i>) utilizado na coleta dos dados.....	104
Figura 45 - Sobreposição dos dados batimétricos coletados (linhas na cor vermelha) com as linhas planejadas (linhas na cor amarela). Os círculos na cor verde indicam regiões do reservatório que não foram coletadas informações pela batimetria convencional.	106
Figura 46 - Fluxograma apresentando a metodologia empregada na análise da qualidade dos pontos contendo os valores altimétricos extraídos da batimetria <i>multi-media</i>	110
Figura 47 - Identificação dos pontos da batimetria convencional que são coincidentes com a parte seca do reservatório, na época do recobrimento fotogramétrico	114
Figura 48 - Evolução do erro sistemático com o aumento da profundidade. No eixo X tem-se os valores do erro sistemático e no eixo Y tem-se as medidas de profundidade	120
Figura 49 - Gráfico da variação do Desvio Padrão com o aumento da profundidade.....	121
Figura 50 – Modelo topográfico com qualidade altimétrica comprovada para o reservatório de Cachoeira, para as profundidades compreendidas entre 0,61 m até 3,00 m, sobreposto ao ortomosaico	127
Figura 51 - Modelo topográfico com qualidade altimétrica comprovada para o reservatório de Cachoeira, para as profundidades compreendidas entre 0,61 m até 3,00 m	128
Figura 52 – Exemplos das categorias de ocorrências identificadas no ortomosaico com valores dos erros altimétricos excedendo o estabelecido na classe B do PEC altimétrico para escala 1:2.000. (A) Região com o efeito <i>sun-glint</i> completamente corrigido. (B) Área com remanescente parcial do efeito	

sun-glint. (C) Região do reservatório com sombras e nuvens. (D) Pontos próximos às bordas do reservatório..... 130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de parâmetros de operação envolvidos nos sistemas LiDAR batimétrico e topográfico.....	41
Tabela 2 - Coordenadas geodésicas para a estação da RBMC SPBP e para a base do voo fotogramétrico.....	74
Tabela 3 - Nomenclatura das imagens relativas às faixas de voo.....	75
Tabela 4 - Coordenadas geodésicas para a estação pertencente a RBMC SPBP e para as bases de campo utilizadas no rastreamento para os HV e CK	78
Tabela 5 - Correlação entre medidas de profundidades e altitudes geométricas extraídas da batimetria convencional realizada para o reservatório de Cachoeira	108
Tabela 6 - Valores estabelecidos pelo Decreto nº 89.817 para controle da qualidade dos produtos cartográficos.....	111
Tabela 7 - Valores de referência da equidistância entre as curvas de nível em relação a escala do mapa.	111
Tabela 8 - Estatísticas calculadas para a parte seca do reservatório contendo erros grosseiros (A) e após sua eliminação na análise (B)	114
Tabela 9 - Tabela resumo da análise do modelo topográfico gerado para a parte seca do reservatório	116
Tabela 10 - Estatísticas calculadas para cada intervalo de profundidade registrada pelo <i>single-beam</i> para o reservatório de Cachoeira.....	118
Tabela 11 - Estatísticas calculadas para o conjunto de pontos da batimetria com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m, após remoção dos erros grosseiros.....	121
Tabela 12 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe A para escala 1:1.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m.....	122
Tabela 13 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe B para escala 1:1.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m.....	123
Tabela 14 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe A para escala 1:2.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m.....	123
Tabela 15 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe B para escala 1:2.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m.....	124
Tabela 16 - Estatísticas calculadas para o conjunto de pontos da batimetria com profundidades compreendidas entre 3,00 m e 4,00 m, após remoção dos erros grosseiros.....	124

Tabela 17 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe B para escala 1:2.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 3,00 m e 4,00 m.....	125
Tabela 18 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe B para escala 1:2.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 3,00 m e 4,00 m.....	126
Tabela 19 - Quantitativos nominais e percentuais da classificação realizada para os pontos cujos erros altimétricos foram superiores ao valor estabelecido na avaliação do PEC altimétrico classe B na escala 1:2.000.....	130
Tabela 20 - Classificação dos pontos identificados como erros grosseiros na avaliação do PEC em diferentes categorias de ocorrências	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AJB	Águas Jurisdicionais Brasileiras
ALB	<i>Airborne LiDAR Bathymetry</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CASI	<i>Compact Airborne Spectrographic Imager</i>
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
COHEBE	Companhia Hdrelétrica de Boa Esperança
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DMC	<i>Digital Media Camera</i>
FE	<i>First Echo</i>
FOV	<i>Field of View</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
IINT	Imagem de Intensidade
IMU	<i>Inertial Moviment Unit</i>
KHz	Kilohertz
LAS	LASer
LE	<i>Last Echo</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
Nd	Neodímio
nm	Nanômetros
NP_c	Nuvem de Pontos Classificada
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
pts/m²	Pontos por metro quadrado
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i>
RGBNir	<i>Red, Green, Blue e Near Infrared</i>
RN	Referência de Nível
SONAR	<i>SOund Navigation and Ranging</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
TOF	<i>Time-Of-Fly</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
VHF/ UHF	<i>Very High Frequency/ Ultra High Frequency</i>
Z/I	<i>Zeiss/ Intergraph</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA	22
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
2	BATIMETRIA POR SENSORES REMOTOS ATIVOS E PASSIVOS	25
2.1	SONAR	26
2.2	SISTEMA DE PERFILAMENTO LIDAR BATIMÉTRICO	34
2.3	IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL	43
2.3.1	<i>Batimetria Multi-media</i>	46
2.3.2	<i>Batimetria Multiespectral</i>	57
3	REFLEXÃO ESPECULAR EM CORPOS D'ÁGUA (<i>SUN-GLINT</i>).....	62
4	CASO PRÁTICO: BATIMETRIA <i>MULTI-MEDIA</i> APLICADA AO RESERVATÓRIO DE CACHOEIRA	68
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	68
4.2.	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	71
4.3.	RECOBRIMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO.....	73
4.3.1.	<i>Pontos de apoio suplementar</i>	76
4.3.2.	<i>Orientação das imagens e geração dos produtos aerofotogramétricos</i>	78
4.4.	CORREÇÃO/ATENUAÇÃO DO EFEITO <i>SUN-GLINT</i> NAS IMAGENS AÉREAS	87
4.5.	CORREÇÃO DOS EFEITOS DE REFRAÇÃO DA LUZ.....	93
4.6.	BATIMETRIA CONVENCIONAL POR <i>SINGLE-BEAM</i>	99
5	ANÁLISE DA QUALIDADE DO MODELO BATIMÉTRICO ORIUNDO DA BATIMETRIA <i>MULTI-MEDIA</i> E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	107
5.1	VISÃO GERAL DO PROCESSO.....	107
5.2.	DIRETRIZES ESTABELECIDAS NA AVALIAÇÃO DO PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICO (PEC) CONFORME DECRETO 89.817	111
5.3.	AVALIAÇÃO DA PARTE SECA DO RESERVATÓRIO	113
5.4.	AVALIAÇÃO DA TOPOGRAFIA SUBMERSA NO MODELO DERIVADO DA BATIMETRIA <i>MULTI-MEDIA</i>	116
5.5.	AVALIAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS TESTADOS COM VALORES DOS ERROS ALTIMÉTRICOS ACIMA DO VALOR DO PEC.....	129
5.6.	AVALIAÇÃO DO EFEITO <i>SUN-GLINT</i> E OCORRÊNCIAS DE SOMBRAS NA GERAÇÃO DO MODELO DERIVADO DA BATIMETRIA <i>MULTI-MEDIA</i>	131
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	134

REFERÊNCIAS139

ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO PARA A CÂMARA DMC145

**APÊNDICE A – PLANO DE VOO FOTOGRAMÉTRICO PARA O RESERVATÓRIO DE CACHOEIRA
153**

APÊNDICE B – MONOGRAFIA DOS PONTOS DE APOIO SUPLEMENTAR.....155

**APÊNDICE C – ALGORITMO DE LYZENGA PARA CORREÇÃO/ATENUAÇÃO DO EFEITO *SUN-
GLINT* ESCRITO EM PYTHON174**

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Conhecer a topografia submersa a um corpo d'água consiste em tarefa de grande relevância para compreensão dos ambientes aquáticos e suas dinâmicas. Assim como a topografia terrestre tem por objetivo mapear as elevações e depressões de sua superfície, a batimetria tem como finalidade o mapeamento de acidentes topográficos submersos, sendo que o resultado obtido traz uma visão detalhada das características físicas do fundo topográfico do mar, lagos, rios e reservatórios (CONSTANZA; FARLEY, 2007).

As informações produzidas pela batimetria são fundamentais para diversas aplicações, abrangendo desde a navegação marinha (IRISH; WHITE, 1998) até pesquisas geológicas (FINKL; BENEDET; ANDREWS, 2005) e estudos em biologia marinha (GEYMAN; MALOOF, 2019).

A navegação e segurança marítima requer um conhecimento detalhado do relevo submerso visando a segurança de embarcações evitando acidentes em grande escala, principalmente em regiões portuárias. As rotas pré-definidas devem evitar as áreas mais rasas ou obstruções submersas que possam representar perigo (COSTANZA; FARLEY, 2007).

Sabe-se que a topografia submersa influencia a circulação oceânica e portuária, os habitats marinhos e distribuição de espécies. Compreender esta topografia ajuda pesquisadores a prever mudanças ambientais e avaliar os impactos humanos no ecossistema (HIGGINS; JAFFE; FULLER, 2007).

Ainda sobre a importância do conhecimento do universo submerso a corpos d'água podemos reforçar a grande relevância da batimetria em pesquisas geológicas e arqueologia situadas no fundo de rios e mares. No contexto geológico a batimetria pode revelar informações sobre processos geológicos passados e presentes, como a tectônica das placas, erupções vulcânicas, erosão e sedimentação. Já no âmbito arqueológico, as técnicas batimétricas contribuem na descoberta de vestígios arqueológicos, como navios naufragados e civilizações antigas (PICKRILL; TODD, 2003).

No contexto de reservatórios aquáticos, a batimetria desempenha um papel essencial na gestão hídrica. Por meio das técnicas batimétricas é possível determinar o volume de água armazenada, realizar previsões, monitorar o assoreamento, identificar áreas

de erosão ou instabilidade próximo a barragens, garantir uma utilização segura e eficaz para atividades de pesca e navegação (CONSTANZA; FARLEY, 2007).

Não se pode deixar de citar aqui a utilização da batimetria como grande coadjuvante na identificação de habitats aquáticos, gestão de recursos para geração hidrelétrica e no monitoramento da qualidade da água, uma vez que a topografia submersa influencia a circulação da água, a dispersão de poluentes etc.

As técnicas de batimetria convencional, por serem consolidadas e apresentarem bons resultados no que tange a representação topográfica do fundo submerso e no que compete a qualidade dos dados (posicional e profundidade/altimétrico), é bastante difundida e utilizada na comunidade, ainda mais com o advento do GNSS que proporcionou uma maneira mais rápida de obter a posição tridimensional, além de registrar a trajetória da embarcação e conseqüentemente para o mapeamento. Os sensores remotos ativos mais utilizados na batimetria convencional por SONAR são o monofeixe (*single-beam*) e o multifeixe (*multi-beam*) (WOZENCRAFT; MILLAR, 2005).

Com o passar dos anos, novos sensores e técnicas foram desenvolvidas para a batimetria, permitindo o recobrimento de grandes áreas, principalmente oceânicas, trazendo excelentes resultados na representação topográfica submersa não deixando de lado a qualidade geométrica.

Neste contexto podemos incluir o sistema batimétrico LiDAR aerotransportado, cujo equipamento principal é o sensor remoto ativo laser que opera na faixa espectral visível do verde (comprimentos de onda de ~532 nm), sendo este o motivo de ser conhecido na comunidade como *Green LiDAR*. Cabe dizer que o *Green LiDAR* é um sensor com elevado custo de aquisição e por esta razão estima-se que existam poucos equipamentos de LiDAR batimétrico em operação no mundo (GORDON, 1978).

A batimetria por imagens emerge como uma técnica em constante estudo e disseminação no campo do mapeamento subaquático. Esta técnica pode ser considerada uma alternativa competitiva com relação à batimetria convencional em alguns contextos de atividades que não requerem grande precisão e acurácia, dado que as metodologias conhecidas são capazes de produzir modelos topográficos

representativos de áreas rasas submersas, tornando-se uma ferramenta valiosa para estudos preliminares.

Uma das grandes vantagens desta abordagem é a possibilidade de usar imagens orbitais de acervo, permitindo não apenas um estudo da topografia subaquática atual, mas também uma análise temporal. Adicionalmente, algumas imagens derivadas de sensores orbitais podem ser fornecidas gratuitamente ou a um custo mais reduzido, tornando os estudos batimétricos por imagens multiespectrais mais acessíveis do ponto de vista financeiro.

No que diz respeito às imagens aéreas, é relevante destacar que, em muitos projetos aerofotogramétricos, as imagens adquiridas em corpos d'água (córregos, rios e lagos) bem em costas litorâneas, são frequentemente descartadas por não serem o foco do mapeamento e não trazerem uma boa correlação entre as imagens durante o processo de correlação de imagens, deixando de serem aproveitadas como recurso potencialmente útil para a análise batimétrica.

Na literatura, como citaremos oportunamente, são encontradas duas técnicas de batimetria que utilizam como insumo principal imagens tomadas por sensores remotos passivos: batimetria *multi-media* e batimetria multiespectral.

Na batimetria *multi-media*, o objetivo da técnica consiste na correção do efeito da refração da luz nos pontos da nuvem fotogramétrica gerados pela correlação de imagens e localizados no corpo d'água. O grande desafio desta técnica é utilizar a Lei de *Snell* para corrigir o deslocamento aparente do feixe de luz ao passar do meio aquático para o ar, que é transferido para as coordenadas tridimensionais de cada ponto gerado pela correlação de imagens.

A batimetria multiespectral, como o próprio nome sugere, requer a utilização de bandas espectrais, correlacionadas entre si por meio de um modelo matemático, utilizando a informação da radiância atmosférica registrada pelo sensor para estimar as medidas de profundidades em corpos d'água. Nesta técnica, o princípio fundamental é que à medida que a profundidade em um corpo d'água aumenta, maior é a atenuação da radiação eletromagnética incidente, como se explicará mais adiante neste trabalho.

No que tange às técnicas de batimetria por imagens, elas apresentam bons resultados quando aplicadas em regiões costeiras com baixa turbidez da água bem como

imagens isentas do efeito *sun-glint*² (reflexo do sol na água), condições que são fundamentais para o sucesso na obtenção do modelo batimétrico.

Diante do apresentado pode-se dizer que a estimativa da topografia em regiões submersas é essencial para a gestão adequada dos recursos hídricos. Embora existam diferentes equipamentos e técnicas empregadas, a modelagem topográfica não é uma tarefa trivial. Tradicionalmente a batimetria convencional por sensores remotos ativos (SONAR) desempenha um papel central e consolidado na determinação do relevo submerso, porém, tem-se um alto custo envolvido principalmente quando realizado em extensas áreas. No entanto, a emergência das técnicas de batimetria por imagens pode ser uma alternativa mais econômica, sem deixar de fornecer uma boa representação da topografia submersa em águas rasas.

Esta pesquisa de Doutorado versa sobre a exploração da técnica de batimetria *multi-media* aplicada a um reservatório de água no contexto brasileiro, chegando até a aplicação prática de obter um modelo da topografia submersa. O maior desafio nesta pesquisa consistiu em apresentar estratégias que minimizem a influência dos efeitos atmosféricos (*sun-glint*) presentes nas imagens e que possuem grande influência na qualidade do modelo topográfico submerso.

O modelo batimétrico gerado foi avaliado no que tange à qualidade geométrica em relação às profundidades encontradas, comparando com a técnica tradicional, avaliando a qualidade da batimetria *multi-media*, suas limitações e a validação das estratégias adotadas nesta pesquisa.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa desta tese consiste em mostrar/provar que a técnica da batimetria *multi-media* é uma tecnologia possível de ser utilizada na modelagem topográfica do relevo submerso de reservatórios de água (principalmente nas partes mais rasas/borda), apresentando algumas vantagens quando comparada com a batimetria convencional. Isso foi mostrado através da aplicação desta técnica ao

² *Sun-Glint* também conhecido como *Hot-Spot*, neste trabalho refere-se à saturação do brilho de pixels contidos em regiões de corpos d'água nas imagens aéreas, ocorridos como resultado da reflexão especular.

reservatório de água Cachoeira, pertencente ao sistema Cantareira, gerido pela SABESP e que abastece parte da cidade de São Paulo.

Como objetivos específicos, necessários para alcançar os resultados, tem-se:

- a) Realizar a orientação dos modelos fotogramétricos tomados para a área de interesse e obter os produtos cartográficos desse reservatório: nuvem de pontos fotogramétricos e ortomosaico, que são produtos bases para esta pesquisa.
- b) Aprofundar nos conhecimentos relativos à técnica de batimetria *multi-media*, para aplicar a correção da refração da luz na nuvem de pontos gerada pela correlação de imagens, utilizando o módulo *Snellius* do *software* OPALS.
- c) Verificar as ocorrências de sombras e efeito *sun-glint* nas imagens durante a aquisição (dado de insumo) bem como sua influência na qualidade no modelo batimétrico obtido e implementar uma estratégia para corrigir os efeitos que degradam a qualidade do resultado.
- d) Testar algoritmos de correlação de imagens e verificar aquele que apresenta melhores resultados na geração da nuvem de pontos fotogramétrica em corpos d'água.
- e) Testar a qualidade altimétrica do modelo gerado pela batimetria *multi-media*, utilizando algumas diretrizes estabelecidas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984, tomando como referência os pontos coletados pela batimetria convencional por *single-beam*.
- f) Verificar se a técnica da batimetria *multi-media* é capaz de gerar informações com qualidade na zona de transição entre a parte seca e parte submersa da borda do corpo d'água, tendo em vista a limitação da batimetria convencional nessa região. O resultado obtido foi positivo.

Esta tese de doutorado se destaca pela inovação metodológica desenvolvida utilizando a técnica de batimetria *multi-media* aplicada em reservatórios de água no Brasil. Ela não só introduz uma estratégia alternativa de representação topográfica do relevo submerso como valida a importância da remoção do efeito *sun-glint* nas imagens aéreas antes da realização da correlação de imagens. A identificação do

algoritmo mais eficaz para correlação de imagens em corpos d'água fecha a tríplice inovação desta tese de doutorado.

A avaliação da qualidade do modelo batimétrico obtido valida a proposição central desta tese que consiste na viabilidade de gerar um produto com qualidade utilizando a técnica de batimetria *multi-media*. Este produto emerge como uma fonte de informação valiosa, particularmente em áreas mais rasas de um reservatório de abastecimento de água no contexto brasileiro, superando as limitações encontradas ao se utilizar técnicas de batimetria convencionais para aquisição de informações nestas regiões. Para reservatórios com menor turbidez e menos regiões com o efeito *sun-glint*, os resultados esperados são ainda melhores, em termos de qualidade altimétrica e alcance em profundidade.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta seção delinea a estrutura dos capítulos desta tese.

O Capítulo 1 traz uma introdução concisa ao tema, destacando a relevância da batimetria na ilustração do relevo submerso e oferecendo uma visão inicial das técnicas de batimetria disponíveis.

O Capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, focando nos diferentes tipos de sensores remotos utilizados na coleta de dados para o mapeamento topográfico em corpos d'água.

No Capítulo 3, a reflexão especular em corpos d'água é elucidada, juntamente com estratégias para sua atenuação ou eliminação em imagens multiespectrais.

O Capítulo 4 concentra-se na caracterização da área de estudo e na explicação detalhada da metodologia aplicada nesta pesquisa.

Os resultados alcançados, bem como as discussões pertinentes, são apresentados no Capítulo 5, enquanto o Capítulo 6 encerra a tese com conclusões e recomendações futuras para pesquisas no campo da batimetria por imagens.

2 BATIMETRIA POR SENSORES REMOTOS ATIVOS E PASSIVOS

Neste Capítulo são apresentados os sensores remotos ativos empregados na coleta das informações batimétricas (SONAR e Sistema LiDAR Batimétrico), bem como as técnicas empregadas em águas rasas utilizando imagens tomadas por sensores remotos passivos.

No que se refere aos sensores ativos SONAR e Sistema LiDAR Batimétrico serão descritos brevemente os princípios de funcionamento e algumas de suas características operacionais.

Na descrição da batimetria por imagens, serão detalhadas as duas técnicas encontradas na literatura: batimetria *multi-media* e batimetria multiespectral. Para ambas serão descritas a fundamentação teórica e matemática envolvida, bem como as limitações e alguns fatores que influenciam na qualidade dos modelos batimétricos gerados por elas.

Antes de adentrar nas definições/descrições acima mencionadas, é importante apresentar alguns conceitos básicos sobre sensores remotos ativos e passivos. Jensen (2009) salienta que os sensores remotos ativos apresentam como principal característica a não dependência da Radiação Eletromagnética (REM) proveniente do Sol ou de propriedades termais dos objetos para aquisição da informação. Eles geram sua própria energia e as transmitem para a superfície física da Terra que, após a interação com os alvos, é retroespalhada sendo parte retornada e registrada pelo sensor. Ainda segundo o autor, uma das principais características da energia gerada por um sensor remoto ativo é que esta possui pouca degradação devido a interferência ocasionada pelo ambiente.

Por outro lado, os sensores remotos passivos são aqueles que registram a energia refletida na superfície terrestre, oriundas de uma fonte externa (por exemplo, o Sol). A energia que atinge os sensores passivos é registrada pelos dispositivos de armazenamento de carga (CCD – *Charge-Coupled Device* ou pelo CMOS – *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) transformada em Número Digital (ND), que pode ser traduzida em informações de reflectância ou radiância, dependendo da forma da configuração do sensor utilizado (OLIVEIRA, 2013).

2.1 SONAR

A palavra SONAR (*Sound, Navigation and Ranging* – Navegação e Medição de Distância por Som) é utilizada para se referir ao sensor remoto ativo empregado para realizar medidas topográficas de superfícies submersas utilizando a energia propagada na forma de onda sonora (JENSEN, 2009). O resultado deste levantamento é um conjunto de medidas de distâncias compreendidas entre a lâmina d'água (onde ocorre a operação do SONAR) e a superfície topografia submersa.

O princípio de funcionamento deste sensor tem como base a geração e emissão de energia acústica que se propaga na água a uma velocidade conhecida. O pulso acústico emitido por este sensor é refletido pelo relevo submerso sendo seu eco de retorno captado pelo sistema através de um transdutor que se encontra em comunicação com um contador, que registra o tempo gasto entre a emissão e o retorno do pulso acústico. Em resumo tem-se que o semi-produto do tempo multiplicado pela velocidade de propagação da onda fornece a distância entre o sensor e o fundo topográfico, que posteriormente pode ser convertido em medida de profundidade (BLONDEL, 2009).

Segundo Huff e Noll (2007) as ondas sonoras apresentam características físicas de propagação diferentes de outros tipos de ondas, como as ondas de luz e ondas de rádio. Para as ondas sonoras a energia emitida diminui à medida que se propaga pelo meio e quando há uma mudança do meio de transmissão (com seu índice de refração) altera-se a direção de propagação. No caso do SONAR quando a onda acústica inverte sua direção é porque ocorreu uma reflexão da onda pelo relevo ou por algum objeto submerso.

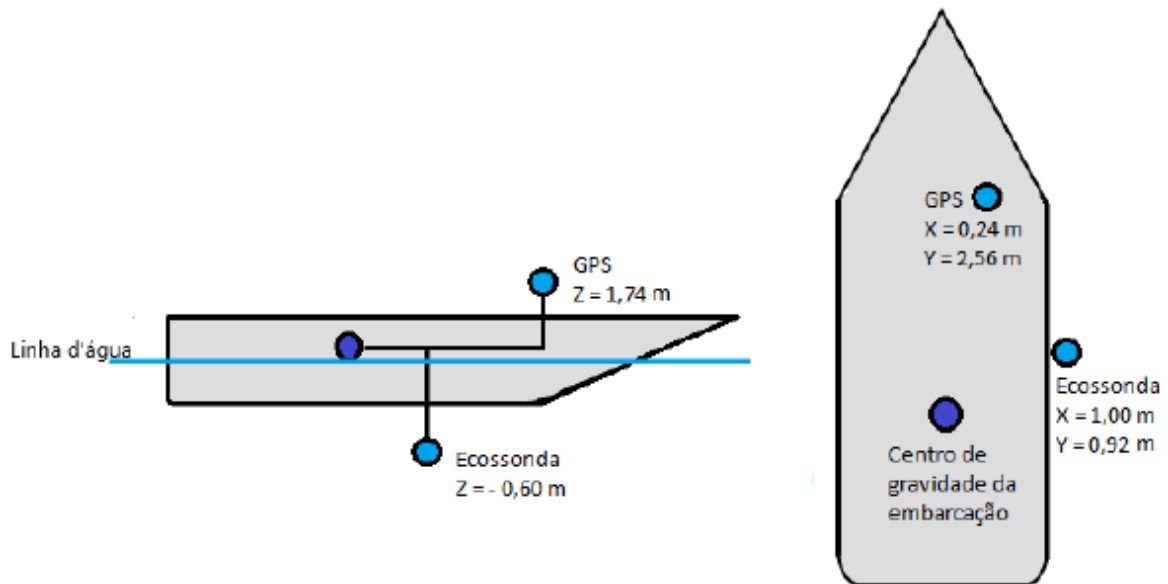
A definição e a representação do fundo topográfico baseiam-se no princípio da transmissão e detecção da energia sonora, sendo medidos com precisão o tempo de viagem do pulso acústico (entre emissão e recepção) e a direção de retorno. As variáveis obtidas (tempo e direção) podem ser convertidas em posições tridimensionais tendo como referência a localização do transdutor de emissão e recepção, que possui sua posição conhecida, em cada medição.

Para realizar a batimetria deve-se preparar a embarcação montando em conjunto o receptor GNSS e o SONAR. Os pulsos acústicos têm suas posições planialtimétricas determinadas por meio das observações GNSS coletadas durante a operação. Estas

observações, na maioria dos levantamentos, são determinadas pela técnica de posicionamento DGPS que, segundo Silva e Segantine (2015), consiste em uma técnica utilizada para determinar em tempo real a posição de um receptor móvel por meio de medidas de pseudodistância entre os satélites e a antena, em conjunto com correções diferenciais transmitidas por uma antena fixa instalada sobre um ponto cujas coordenadas são previamente conhecidas/estimadas. Ainda segundo esses autores estas correções são necessárias para compensar a influência dos erros das órbitas dos satélites e da atmosfera.

Uma vez instalados o receptor GNSS e o SONAR deve-se realizar a medida dos *offsets* (diferenças entre as posições de montagem) entre estes equipamentos e o centro de gravidade do barco. Estas medidas são fundamentais para realizar o georreferenciamento direto das observações acústicas. A Figura 1 ilustra a montagem dos equipamentos no barco bem como exemplos de valores dos *offsets* medidos entre os equipamentos e o centro de gravidade do barco em um levantamento batimétrico.

Figura 1 - *Offsets* entre o centro de gravidade da embarcação e os equipamentos: GNSS e SONAR



Fonte: O Autor.

Conforme mencionado, o mapeamento tridimensional realizado pelo SONAR baseia-se no princípio da geração, emissão e recepção de ondas sonoras propagadas na água. Assim, todo SONAR possui um transdutor de energia para converter o sinal elétrico em energia sonora antes de sua emissão no meio (água). Este transdutor,

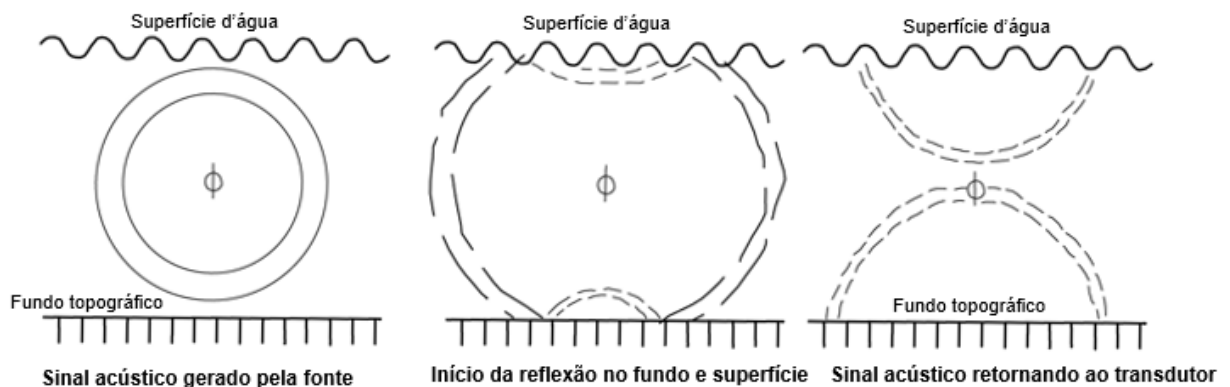
após a reflexão e recepção do pulso sonoro, realiza a operação inversa, ou seja, converte a energia sonora em pulso elétrico, registrando assim a informação em forma digital.

A propagação da onda sonora em uma massa d'água obedece a uma geometria circular. Esta característica deve-se ao fato de que a variação da pressão é a mesma em todas as direções da onda sonora projetada. À medida que a onda sonora avança em seu percurso na coluna d'água, ocorre uma expansão do raio da onda e, conseqüentemente, um aumento da área da seção transversal que é proporcional ao quadrado da distância percorrida em relação ao ponto de sua emissão (GUENTHER, 2007). E, como consequência, a intensidade do sinal cai proporcionalmente ao quadrado da distância.

Os ecos sonoros, após a reflexão no fundo topográfico, se propagam novamente em direção ao transdutor sendo recebidos neste na direção vertical.

A Figura 2 exemplifica o comportamento de uma onda sonora após sua emissão, reflexão e recepção pelo transdutor de energia. Nesta figura, no momento inicial são geradas as ondas acústicas circulares no meio (água), que vão se expandindo à medida que avançam em sua propagação. Quando estas ondas acústicas encontram um objeto (neste exemplo a superfície do corpo d'água e o relevo submerso) inicia-se a reflexão, ocorrendo a inversão na direção da propagação. As reflexões ocasionadas vão se expandido no sentido inverso até que são captadas pelo transdutor de recepção localizado na própria fonte geradora de energia.

Figura 2 - Propagação de uma onda acústica na água



Fonte: Adaptado de Guenther (2007).

Existem quatro tipos de equipamentos SONAR: SONAR de feixe vertical (*vertical beam* SONAR), SONAR multifeixe (*multi-beam* SONAR), SONAR de varredura lateral (*side scan* SONAR) e SONAR interferométrico (*interferometric* SONAR), como se pode ver em (NOAA, 2006).

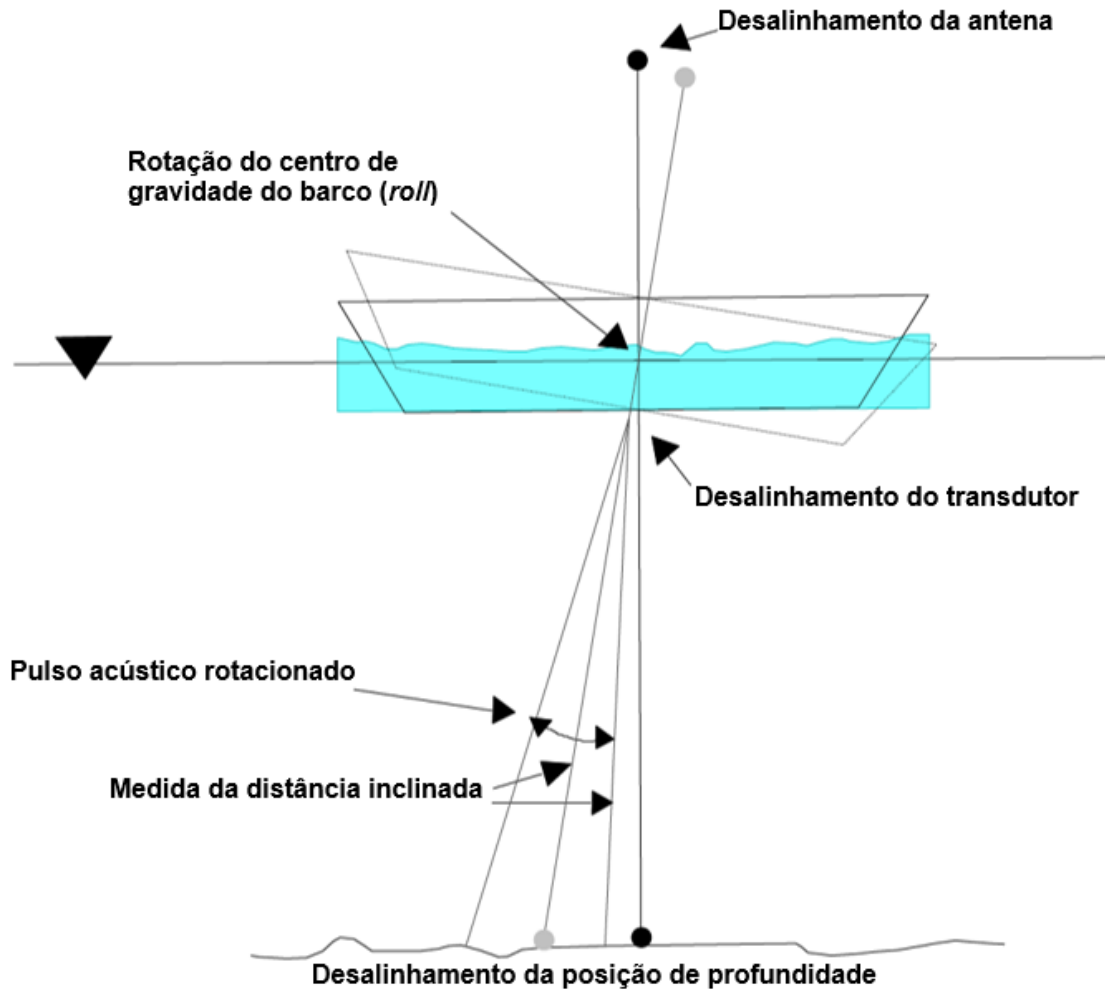
O SONAR de feixe vertical é também conhecido como SONAR de feixe único (*single-beam*). Como o nome sugere, possui em um único transdutor que emite um feixe sonoro na coluna d'água em intervalos pré-configurados sendo utilizado para obter informações quantitativas abaixo da superfície aquática (HUFF; NOLL, 2007).

Neste tipo de equipamento a área de cobertura acústica é bastante reduzida uma vez que seu *footprint* acústico é único com uma área de abrangência pequena pré-estabelecida. Os levantamentos hidrográficos realizados com este equipamento são desenvolvidos ao longo de linhas transversais ou perfis, não sendo possível um recobrimento contínuo do fundo, ou seja, a informação é adquirida por meio de pontos amostrados na seção, a um certo intervalo de tempo/distância. No que se refere à resolução final dos dados coletados estes são determinados pelo tamanho do *footprint* acústico, intervalo de aquisição, velocidade de amostragem e distância entre os perfis (JENSEN, 2009).

A montagem do SONAR de feixe vertical deve seguir uma orientação nadiral, pois assim as ondas acústicas transmitidas irão incidir no fundo topográfico na posição mais próxima da vertical, fazendo com que ocorra uma maximização da energia dos ecos de retorno.

Em alguns casos a aquisição da informação sofre interferências físicas do meio, alterando a posição vertical de recepção e emissão do pulso sonoro. Esta alteração faz com que a medida seja uma distância inclinada, conforme mostrado na Figura 3. Este fato ocorre na presença de ondas na superfície no corpo d'água e/ou pela ocorrência de regiões em que o fundo topográfico é íngreme ou ondulado. Isso provoca mudanças no ângulo de incidência, causando um impacto no cálculo da distância e no tempo de viagem do pulso acústico medido.

Figura 3 - Influência das ondas na superfície na aquisição da informação por um pulso acústico



Fonte: Adaptado de Guenther (2007).

O SONAR de múltiplos feixes (*multi-beam*) fornece aos usuários dois tipos de dados: medidas de profundidade e retroespalhamento acústico (GARDNER et al., 2002).

Este equipamento tem como principal característica a emissão e recepção de pulsos acústicos na posição vertical e inclinada, o que é possível pelo fato de possuir os transdutores de emissão e recepção montados separadamente.

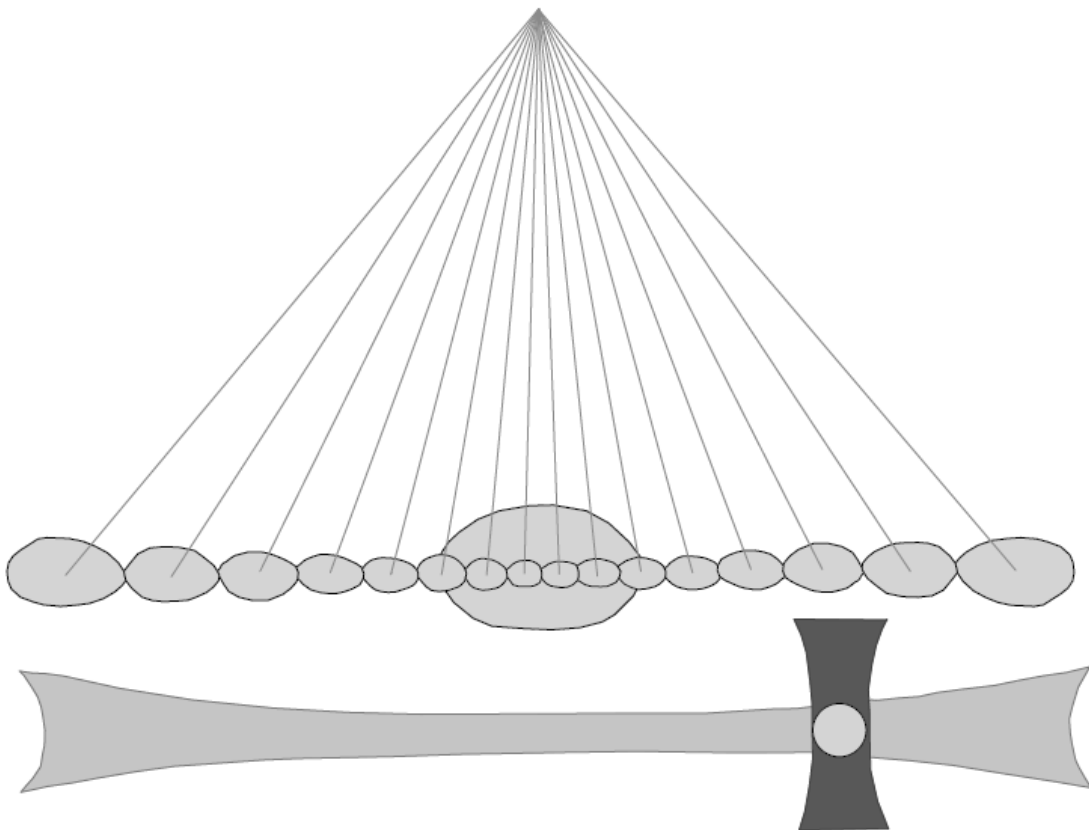
Para Huff e Noll (2007) a principal diferença do SONAR multifeixe para o SONAR de feixe vertical é que este último apresenta uma maneira única de processar e interpretar os ecos acústicos recebidos. Eles se baseiam na medida de tempo de transmissão do eco no fundo topográfico. Por meio do ângulo nadiral e de funções trigonométricas, os tempos de percurso são convertidos em um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais (planimétricas e profundidade) estimadas em relação à posição de

montagem do transdutor multifeixe. Com os *offsets* (Figura 1) e a posição dada pelo GNSS, calcula-se a posição absoluta do ponto capturado no relevo submerso.

O transdutor no SONAR de múltiplos feixes é linear montado no sentido longitudinal. Esta geometria mantém o *footprint* dos ecos acústicos que são incidentes na posição do nadir e, para os demais que estão mais afastados do nadir, o *footprint* apresenta uma pequena deformação tornando-os alongados com geometria próxima à de uma elipse (Figura 4).

Pela Figura 4 nota-se que a partir de um transdutor montado no sentido longitudinal são transmitidos “*n*” pulsos acústicos incidentes sobre diferentes ângulos sendo que à medida que vão se afastando da posição do nadir aumenta o alongamento do eixo maior da elipse.

Figura 4 - Projeção dos *footprints* acústicos em relação ao ângulo de incidência



Fonte: Adaptado de Guenther (2007).

Para Clarke, Lamplugh e Czotter (2005), existe uma relação entre profundidade e largura de recobrimento dos feixes acústicos emitidos pelo SONAR de múltiplos feixe, ficando estabelecido que a largura compreendida na varredura é aproximadamente

dez vezes a profundidade da água. Para Gardner et al. (2002) é recomendado utilizar o SONAR de múltiplos feixes em águas extremamente profundas, da ordem de até 11000 m de profundidade, sendo aplicados nas regiões oceânicas e inclusive nas maiores profundidades abissais.

O SONAR de varredura lateral (*Side Scan Sonar*), é outro equipamento da categoria, utilizado para obter informações quantitativas e como forma complementar de outras medidas qualitativas.

A informação adquirida por este equipamento proporciona uma representação mais detalhada das características do relevo e dos objetos que se localizam sobre eles, por meio de uma imagem pancromática (intensidade).

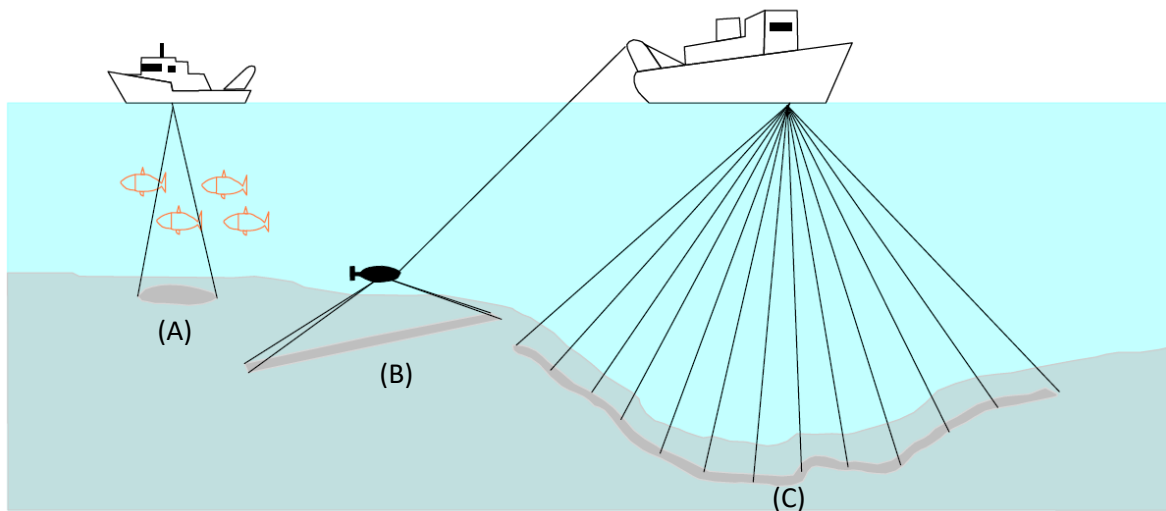
A montagem do SONAR de varredura lateral é feita na parte traseira do barco uma vez que os pulsos são transmitidos por dois transdutores lineares que possibilitam a cobertura de faixas contínuas e com sobreposição, fazendo um recobrimento contínuo da área de interesse. Caso a montagem do equipamento seja feita na lateral do barco pode ocorrer uma interferência deste na propagação dos pulsos em função da abertura ou campo de visada.

A operação deste equipamento é semelhante ao SONAR de múltiplos feixes em que um transdutor lateral emite energia acústica e o transdutor de recepção registra o eco acústico de retorno. A intensidade de retorno é registrada continuamente o que proporciona a elaboração de uma imagem do fundo monocromática. Nesta imagem, o fundo topográfico e seus objetos identificados são representados em cores mais escuras (próximo da cor preta) por terem sido registrados pelos retornos com intensidade mais fortes. Para as áreas de sombras dos objetos ou geradas pela geomorfologia do relevo, evidencia-se uma representação por cores mais claras (níveis de cinza menores nas proximidades do branco) devido à redução de energia do pulso refletido.

Segundo Flemming (1976), a interpretação de uma imagem obtida por SONAR de varredura lateral requer grande experiência do comportamento das respostas acústicas proporcionadas pelos diferentes tipos de objetos (rochas, cascalhos, areia etc).

A Figura 5 apresenta um esquema gráfico ilustrando a realização do recobrimento batimétrico feita por três tipos diferentes de equipamentos: SONAR de feixe único (A), SONAR de varredura lateral (B) e SONAR de múltiplos feixes (C).

Figura 5 - Esquema gráfico ilustrando o recobrimento batimétrico do relevo submerso utilizando o SONAR de feixe único (A), SONAR de varredura lateral (B) e SONAR de múltiplos feixes (C)

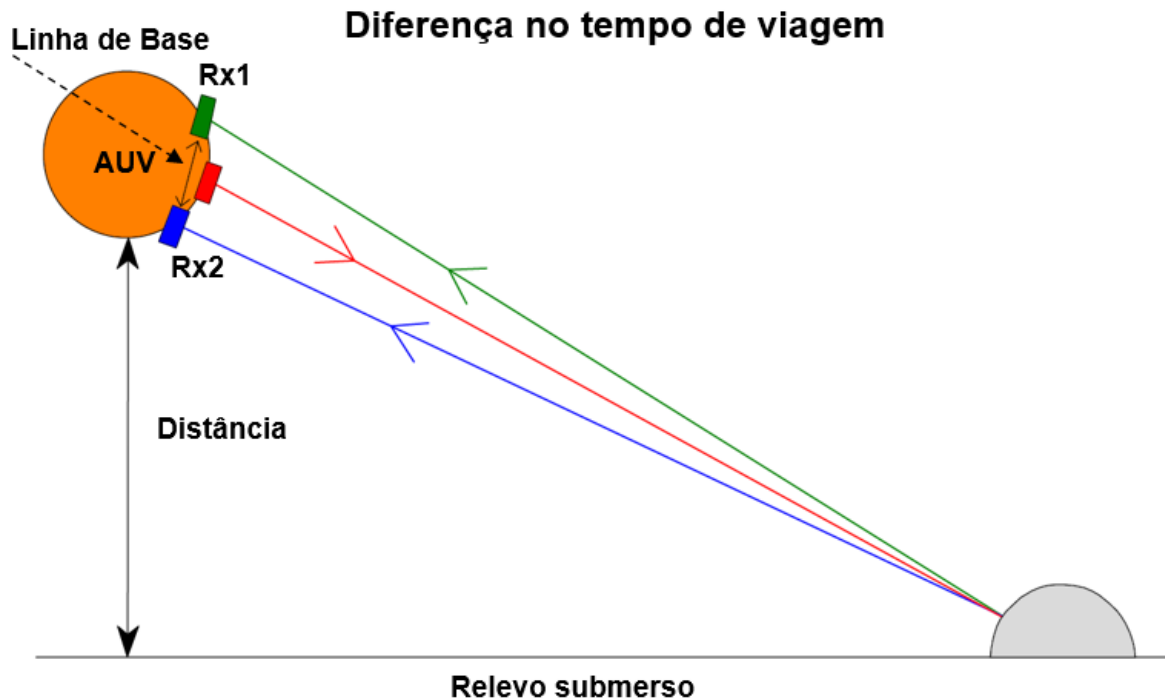


Fonte: Adaptado de Lurton et al. (2015).

O SONAR interferométrico (*Interferometric SONAR*) consiste em um equipamento acústico que foi desenvolvido para adquirir informações qualitativas para as medidas de profundidade e apresenta uma boa resposta ao realizar medidas em posições nadirais e em outras direções. As profundidades estimadas com este equipamento baseiam-se no princípio da interferometria cujo objetivo é determinar a direção angular de uma resposta através do atraso entre o tempo de chegada do sinal em receptores distintos e espacialmente separados (FRANSCSCHETTI; LANARI, 1999).

O SONAR interferométrico é composto por um transdutor de emissão de eco acústico e dois transdutores de recepção, que são montados separadamente em uma plataforma. A Figura 6 traz um esquema gráfico da montagem dos três transdutores que integram o SONAR interferométrico em uma plataforma autônoma AUV (*Autonomous Underwater Vehicle* – Veículo Submarino Autônomo).

Figura 6 - Esquema da montagem dos transdutores (emissão e recepção) integrantes de SONAR interferométrico, acoplados em uma plataforma autônoma AUV. Emissão (feixe em vermelho) e Recepção (feixes em azul e verde)



Fonte: Adaptado de Francsceschetti e Lanari (1999).

Por meio da Equação 2.1 são estimadas as medidas de profundidade quando as informações são coletadas utilizando o SONAR interferométrico.

$$z = r \left(\frac{t \cdot c}{D} \right) \quad (2.1)$$

Para Hanssen (2001) a profundidade relativa obtida pelo SONAR interferométrico (z) pode ser calculada em relação à média das distâncias determinadas em cada um dos transdutores de recepção (r), a velocidade de propagação do som (c), a distância entre os transdutores de recepção (D) e o atraso interferométrico no tempo entre os sinais de chegada (t) dos dois receptores.

2.2 SISTEMA DE PERFILAMENTO LiDAR BATIMÉTRICO

Fiegels e Kopilevich (1993) e Guenther (2007) destacam a importância de conhecer a topografia submersa em lagos, rios e principalmente porções costeiras pelo fato de que estas são consideradas áreas ecológicas, comercialmente importantes a serem

utilizadas no desenvolvimento de algumas atividades como transporte hidroviário, marítimo, geração de energia e outras.

Em alguns casos a batimetria convencional por SONAR tem um alto custo operacional devido à extensão da área a ser mapeada. Nestas regiões, a alta produtividade na coleta da informação e os menores custos não são os únicos objetivos pois é muito importante obter produtos completos (incluindo a topografia localizada em água rasas), com qualidade geométrica e fiéis na representação dos detalhes (SKOGVIK; AXELSON, 2001).

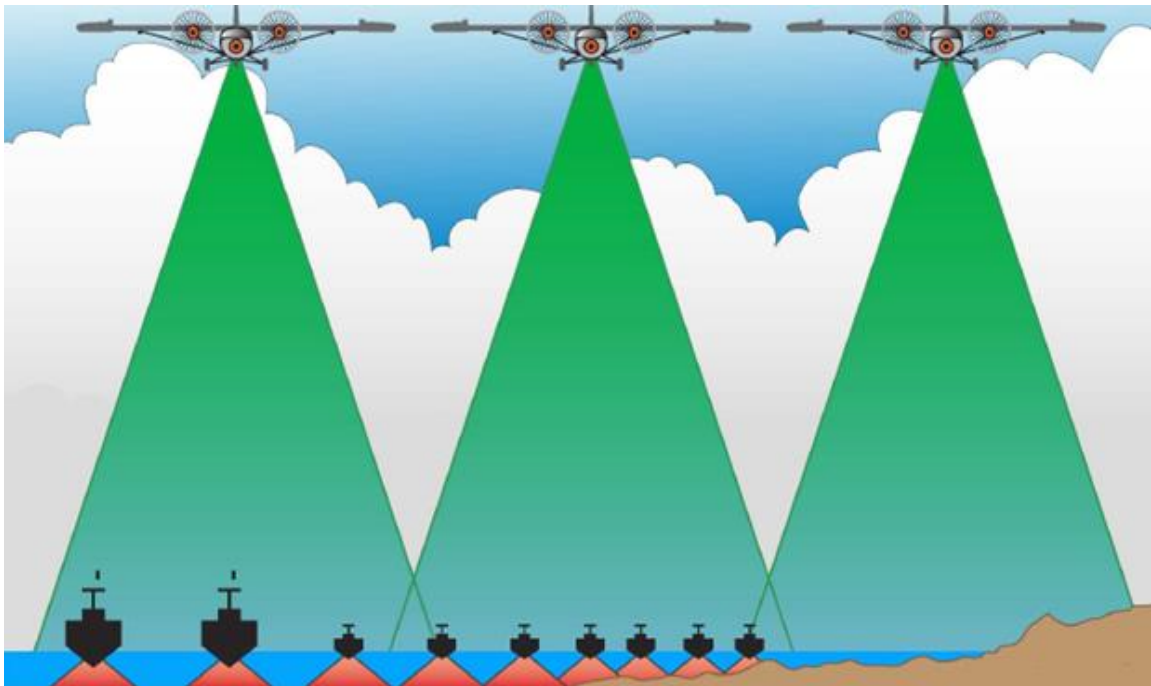
O sistema LiDAR batimétrico aerotransportado (*Airborne LiDAR Bathymetry – ALB*) é um sistema de mapeamento composto por sensor remoto ativo. Suas principais características são operar na banda espectral do verde, com comprimentos de onda variando entre 500 nm – 540 nm. Pelo fato de estar embarcado em uma aeronave proporciona um alto rendimento (produtividade) com um recobrimento de extensas áreas em um curto intervalo de tempo.

Referente a energia eletromagnética propagada por este sensor, é importante reforçar que estes comprimentos de onda apresentam baixa absorção da energia em corpos d'água e, por este motivo, o seu emprego é voltado à coleta/registro de informações do relevo localizados neste contexto.

Além do alto rendimento na coleta da informação com o ALB quando comparado com o SONAR, constata-se também um maior desempenho pelo sistema LiDAR batimétrico no que tange ao recobrimento completo da topografia submersa, incluindo as regiões mais rasas (bordas), as quais podem não ser recobertas pelo SONAR, devido à limitação do barco em aproximar-se mais da borda. A Figura 7 traz um exemplo que ilustra o desempenho do ALB, na aquisição da informação submersa, comparando com um sistema SONAR montado em um barco.

O exemplo apresentado na Figura 7 mostra que, para coletar os dados da topografia submersa em uma região costeira utilizando o sistema SONAR montado em um barco, é necessário o desenvolvimento de nove seções batimétricas, ao passo que como sistema ALB, o recobrimento da mesma área é efetuado com três faixas de voo. Nesta figura tem-se a representação clara de que existe uma lacuna de falta de recobrimento na região costeira (parte mais rasa) pelo SONAR.

Figura 7 - Desempenho da produtividade na aquisição da informação da topografia submersa utilizando o ALB e o SONAR.



Fonte: Guenther (2007).

A maior área recoberta com o sistema ALB explica-se pelo fato de que o equipamento se encontra montado em uma aeronave que, devido a geometria formada entre o sensor e altura de voo (formando uma projeção cônica) possibilita o recobrimento de uma maior área. Além disso, a maior produtividade do sistema está atrelada também à velocidade de cruzeiro do avião (~ 60 m/s) que é superior à do barco (~ 10 m/s quando se utiliza, por exemplo o *single-beam*).

A coleta da informação pelo sistema ALB inicia-se com a geração e envio de uma energia interna que se propaga na atmosfera na forma de pulsos laser. Estes, quando encontram a superfície de um corpo d'água são capazes de adentrar ao mesmo e continuar sua trajetória. Ao penetrar no corpo d'água, o pulso laser sofre um desvio em sua trajetória ocasionado pela refração da luz. No interior do corpo d'água o pulso laser continua sua nova trajetória até encontrar o relevo submerso, refletindo e percorrendo novamente toda trajetória (na coluna d'água e atmosfera) até emergir o corpo d'água e ser registrado pelo sensor.

Por mais que seja efetivo o uso desta tecnologia na aquisição de dados topográficos submersos, existem limitações no que se refere à penetração do pulso laser na água, principalmente no que compete a variável turbidez da água (SHAN; TOTH, 2009).

Alguns autores como Guenther (2007), especialistas em batimetria por ABL, dizem que a penetração máxima dos pulsos *laser* do sistema LiDAR batimétrico, considerando as melhores condições físicas da água é de aproximadamente 70 metros, porém, para poder estimar melhor a profundidade de penetração dos pulsos nos corpos d'água, é recomendado considerar a estimativa de duas a três vezes o valor da profundidade estimada utilizando o disco *secchi*.

O disco *secchi* avalia a turbidez da água, mas é considerado um método rudimentar, não sendo um bom indicador, uma vez que sua relação com o parâmetro ótico adequado e o coeficiente de atenuação difusa sofrem variações com o espalhamento. Mesmo assim, este parâmetro é utilizado em estudos preliminares e no planejamento da coleta de dados envolvendo a tecnologia ALB. A Figura 8 mostra um disco *secchi* sendo utilizado na avaliação da turbidez da água.

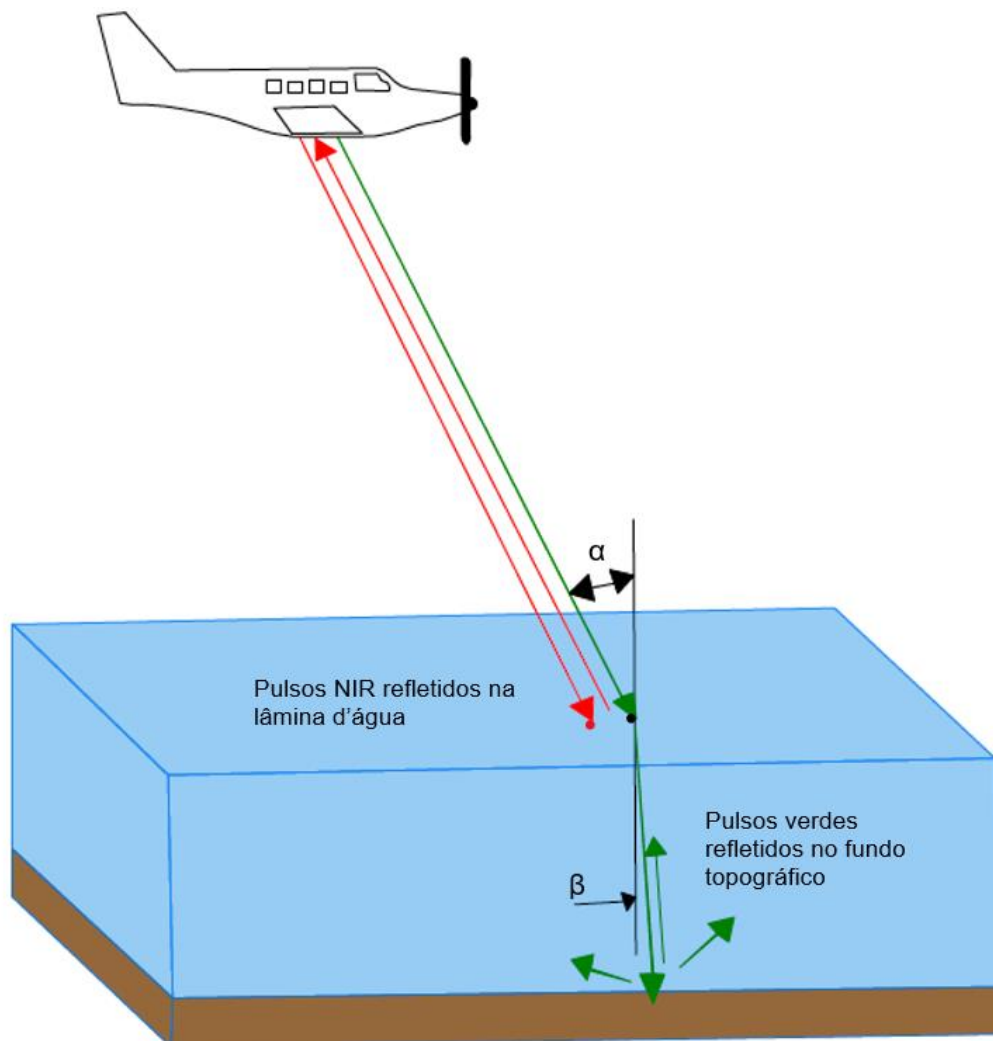
Figura 8 - Utilização do disco *secchi* na avaliação da turbidez da água



A maioria dos sistemas LiDAR batimétrico, além de coletar as informações no canal do verde, possui acoplado o laser topográfico que registra informações utilizando comprimento de ondas geradas com comprimentos de onda no infravermelho (~1046 nm). A utilização conjunta do laser topográfico em um sistema ALB se dá pelo fato de que existe a necessidade de conhecer a distância entre o sensor e a lâmina d'água e, por mais que a energia gerada e emitida pelo laser topográfico seja absorvida/atenuada em corpos d'água, tem-se que parte dela é refletida pelo espelho d'água, sendo registrada pelo sensor após a reflexão (WOZENCRAFT; MILLAR, 2005).

A Figura 9 apresenta um esquema gráfico de um perfilamento batimétrico empregando o sistema ALB, composto pelo laser verde e o laser topográfico.

Figura 9 - Esquema gráfico de operação do sistema LiDAR batimétrico com a operação conjunta dos laser verde e topográfico



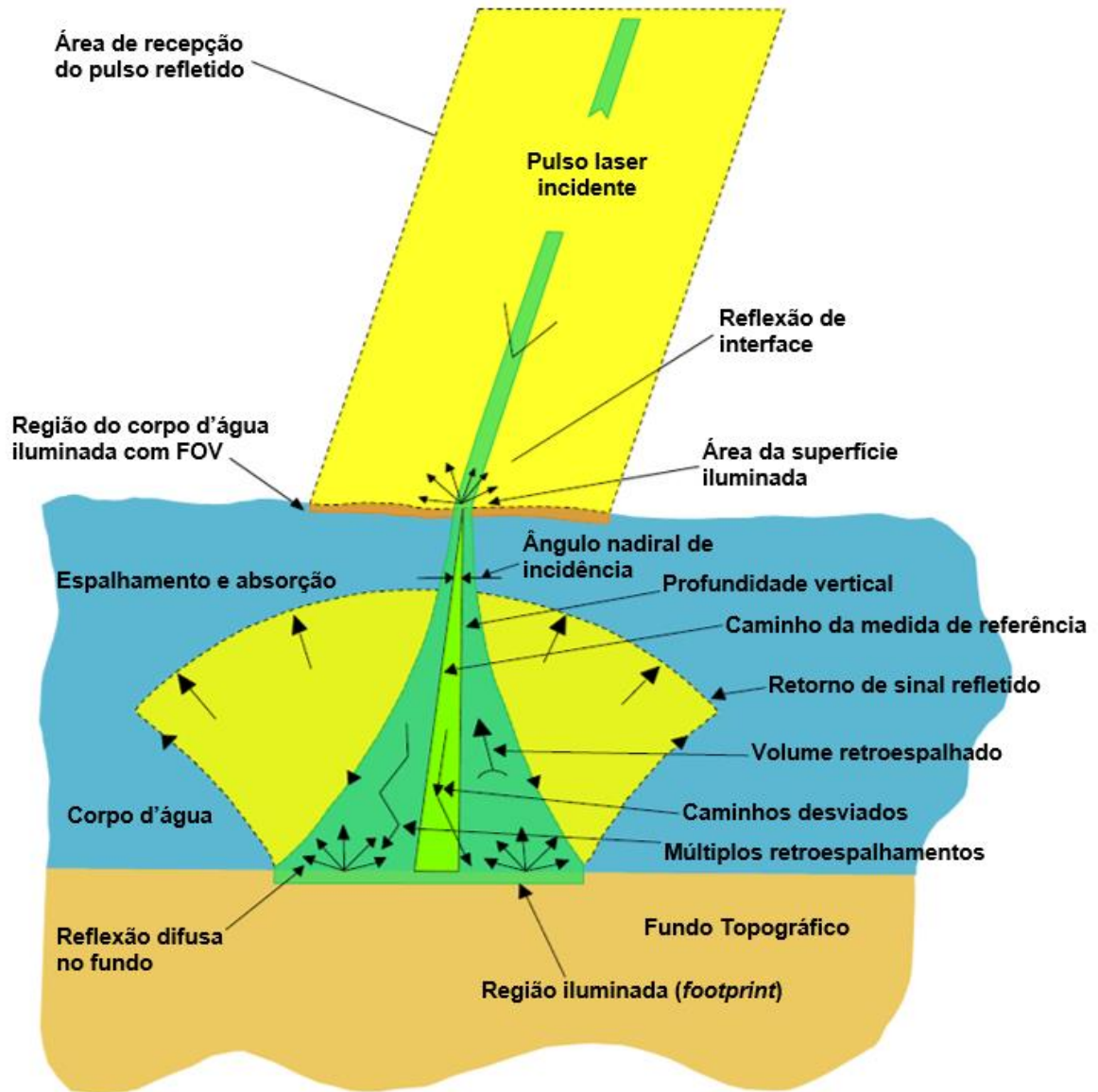
A Figura 9 mostra que o pulso emitido pelo laser topográfico (linhas na cor vermelha), além da atenuação no corpo d'água sofre reflexão do pulso emitido, sendo registrado pelo sensor. Já os pulsos emitidos pelo laser verde, chegam no corpo d'água com um ângulo de incidência que, ao mudar de meio de propagação, sofrem um desvio ocasionado pelo fenômeno da refração da luz.

O desvio na trajetória do feixe de luz também ocorre no caminho inverso, quando o pulso laser é refletido pelo fundo topográfico, deixa o corpo d'água e adentra a atmosfera, percorrendo o caminho em direção ao sensor. Durante os processamentos realizados com as informações coletadas pelo laser verde, a refração da luz é corrigida compensando os deslocamentos nas coordenadas planialtimétricas (Δx , Δy , Δz) ocorridos durante a coleta dos dados.

Assim como o pulso laser topográfico, a energia do pulso verde, antes de atingir à porção topográfica submersa, sofre atenuações na atmosfera que se estendem na coluna d'água. A atenuação da energia incidente ocorre principalmente devido a presença de material orgânico e particulado no corpo d'água, ocasionando respostas ao sensor que uma vez detectados são considerados *outliers* (erros grosseiros) nos processamentos, sendo removidos do conjunto de pontos.

A Figura 10 apresenta uma descrição gráfica detalhada do comportamento do pulso verde a partir do momento em que ele atinge a lâmina d'água, passando então a desenvolver sua trajetória na coluna d'água, até o momento em que ele encontra a topografia submersa. Pela figura pode-se ver que parte do pulso verde, ao incidir sobre a lâmina d'água sofre reflexão especular, diminuindo a energia que irá continuar a percorrer a trajetória na coluna d'água.

Figura 10 - Trajetória percorrida pelo pulso verde desde sua emissão até as reflexões ocorridas no fundo topográfico



Fonte: Adaptado de Guenther et al. (2000).

A radiação de incidência sofre um desvio de sua trajetória ao adentar a coluna d'água devido ao fenômeno da refração da luz. Após penetrar na coluna d'água, o fundo topográfico será iluminado pelo *footprint* que poderá apresentar uma variação em sua forma geométrica e área de cobertura, dependendo das características físicas do corpo d'água, destacando-se a quantidade de particulados em suspensão que são os maiores responsáveis por ocasionar distorções na forma do *footprint* e reflexões parciais.

Apenas uma parte da energia refletida pelo fundo topográfico será registrada pelo sensor, pois após a reflexão ocorrem dispersões para outras regiões que estão fora do campo de visada do sensor localizado na aeronave. A quantidade da energia registrada pelo equipamento corresponde a uma média dos valores das reflexões ocorridas no relevo submerso e na coluna d'água pelo *footprint*.

Para Guenther (2007), as medidas das profundidades estimadas com o sistema ALB levam em conta o tempo entre a emissão do pulso emitido pelo laser topográfico, refletido na superfície do corpo d'água e o tempo medido para o pulso verde refletido no fundo topográfico, dado que eles são emitidos no mesmo instante.

Ainda para Guenther (2007), a variação da velocidade de propagação do pulso laser na água não é considerada uma grande fonte de erro na estimativa das profundidades, pois quando calculados pelo sistema LiDAR batimétrico, não apresentam forte relação com esta variável que, diferentemente do SONAR, no qual a variação da velocidade de propagação do som na água pode variar dependendo da temperatura e salinidade, resultando em grandes variações nas medidas de distância.

No que diz respeito ao funcionamento e operação do sistema ALB, este apresenta algumas características únicas que diferem do sistema topográfico. Nos sistemas batimétricos o campo de visada (FOV - *Field of View*) não pode apresentar uma grande abertura (máxima de 22°) pois grandes ângulos de incidência estão sujeitos a erros de maior magnitude, relacionados ao tempo de retorno dos pulsos superficiais e interiores, uma vez que sua geometria de aquisição é mais ampla.

A altura de voo empregada no perfilamento com o sistema ALB é mais baixa quando comparadas com as alturas de voo desenvolvidas pelo sistema LiDAR topográfico, pois sua frequência de repetição de pulso é inferior. A Tabela 1, baseada nos estudos de Vosselman e Mass (2010), traz um comparativo de algumas variáveis envolvidas na coleta da informação utilizando os dois sistemas laser estudados.

Tabela 1 - Comparação de parâmetros de operação envolvidos nos sistemas LiDAR batimétrico e topográfico

Variáveis	LiDAR batimétrico	LiDAR Topográfico
Altura de voo	200 – 400 m	300 – 1000 m
Frequência de operação	3000 – 4000 Hz	20000 – 64000 Hz
Acurácia horizontal	± 2,5 m	± 2,0 m

Acurácia vertical	$\pm 0,25$ m	-
Acurácia de profundidade	-	$\pm 0,25$ m

Fonte: Adaptado de Vosselman e Mass (2010).

No que concerne à qualidade das observações coletadas com o sistema LiDAR batimétrico, de acordo com testes realizados em alguns sistemas, foi constatado que a acurácia vertical apresenta uma maior degradação nos casos em que existe uma incidência de pulsos com pouca energia na coluna d'água, quando a água apresenta grande turbidez, a topografia apresenta grandes declives e existem pequenos alvos a serem detectados tais como âncoras de plataforma ou tubulações.

A presença de ondas durante a coleta das informações com esta tecnologia bem como ângulos de incidência (muito grandes ou muito pequenos), consistem em fontes de erros nas medidas de profundidade. Estes fatores devem ser considerados nos processamentos de modo a garantir que as distâncias sejam estimadas na direção mais próxima da vertical possível. No que tange às ondas, é sugerido na literatura monitorar a altura das ondas na região de interesse durante o perfilamento batimétrico, obtendo um modelo da superfície do corpo d'água (VOSSELMAN; MASS, 2010).

Para Guenther (2007), a acurácia vertical também é comprometida pela ocorrência do deslocamento horizontal ocorrido com as coordenadas planimétricas que, dependem dos equipamentos de posicionamento utilizado (precisão) ou de interferências externas (Ex.: multicaminhamento) que afetam significativamente os resultados.

No que concerne às limitações de funcionamento do sistema ALB, eles estão diretamente relacionados a fatores físicos e ambientais. Guenther e Goodman (1978) reforçam que a turbidez da água é o fator que mais afeta a precisão na coleta dos dados com este sensor. Segundo os autores esta variável apresenta um comportamento fator exponencial diminuindo a sua eficiência e precisão quanto maior for a turbidez.

Outra dificuldade encontrada durante a aquisição de dados ALB está relacionada à detecção de pequenos objetos (da ordem de 1 m^3). Nestes casos, alguns modelos de SONAR são mais eficientes devido a operarem em alta frequência (quando comparada com a frequência do ALB) e conseqüentemente uma melhor resolução espacial (GUENTHER, 1985).

Para que os pequenos objetos possam ser identificados com confiança quando se utiliza o sistema ALB, a localização destes deve ser tal que sua área inferior iluminada pelo pulso laser esteja mais próxima da aeronave, assim, os comprimentos de luz incidentes também serão menores e menos distorcidos, ou seja, deve-se voar mais baixo.

Outra possibilidade seria o aumento da densidade de pontos do perfilamento, realizando mais de uma passagem da aeronave sobre a mesma área. Deve-se avaliar a real necessidade desta abordagem pois implica em maior custo na aquisição da informação, sem garantia de um bom resultado (ENGSTROM; AXELSSON, 2001).

Por fim, ainda sobre a influência do meio ambiente na aquisição da informação em perfilamentos ALB, fatores ambientais como chuva, neblina, nuvens baixas, ventos fortes, ondas altas, reflexão solar (brilho do sol na água, conhecido como *sun-glint*), encostas muito íngremes e camada de algas também apresentam grande influência na aquisição da informação utilizando esta tecnologia (GUENTHER, 1985; STEINVALL; KOPPARI; KARLSSON, 1994; NAIRN, 1994).

2.3 IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL

A aquisição das informações de propriedades físicas, químicas e biológicas dos objetos pode ser capturada e registrada pelos sensores remotos passivos através da radiação eletromagnética refletida, emitida ou espalhada pelos objetos (LONGLEY et al., 2013).

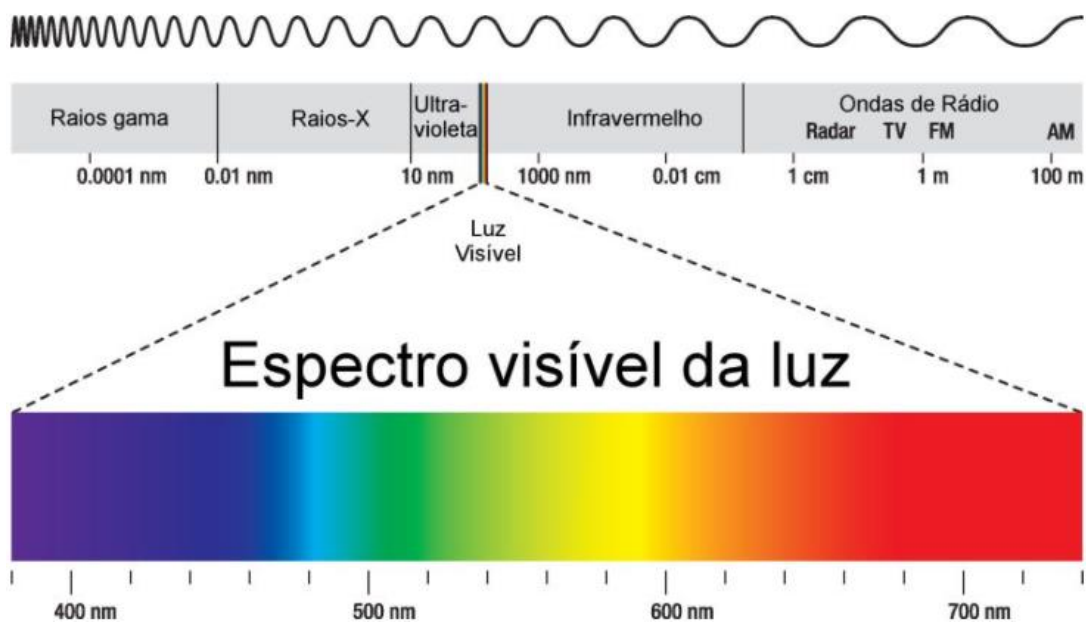
A distribuição da radiação eletromagnética não ocorre apenas com a luz branca, ou seja, ela é distribuída pela decomposição em diferentes comprimentos de ondas, abrangendo desde os curtos comprimentos e altas frequências (raios cósmicos e raios gama), até longos os comprimentos e baixa frequência (ondas de rádio e TV).

Toda as ondas de que a radiação eletromagnética é composta, o ser humano é capaz de enxergar apenas o que se encontra no espectro do visível, distinguindo poucas cores (do violeta ao vermelho). O que não é visto pelo olho encontra-se distribuído no espectro do ultravioleta e do infravermelho, sendo este último subdividido em três categorias:

- Infravermelho próximo que abrange os comprimentos de ondas entre $0,7 \mu\text{m}$ a $1,3 \mu\text{m}$;
- Infravermelho médio que abrange os comprimentos de ondas entre $1,3 \mu\text{m}$ a $6,0 \mu\text{m}$; e
- Infravermelho distante (termal) que abrange comprimento de ondas entre $6,0 \mu\text{m}$ a $1000 \mu\text{m}$.

A Figura 11 apresenta a decomposição da radiação eletromagnética em ondas espectrais.

Figura 11 - Decomposição da radiação eletromagnética em ondas espectrais



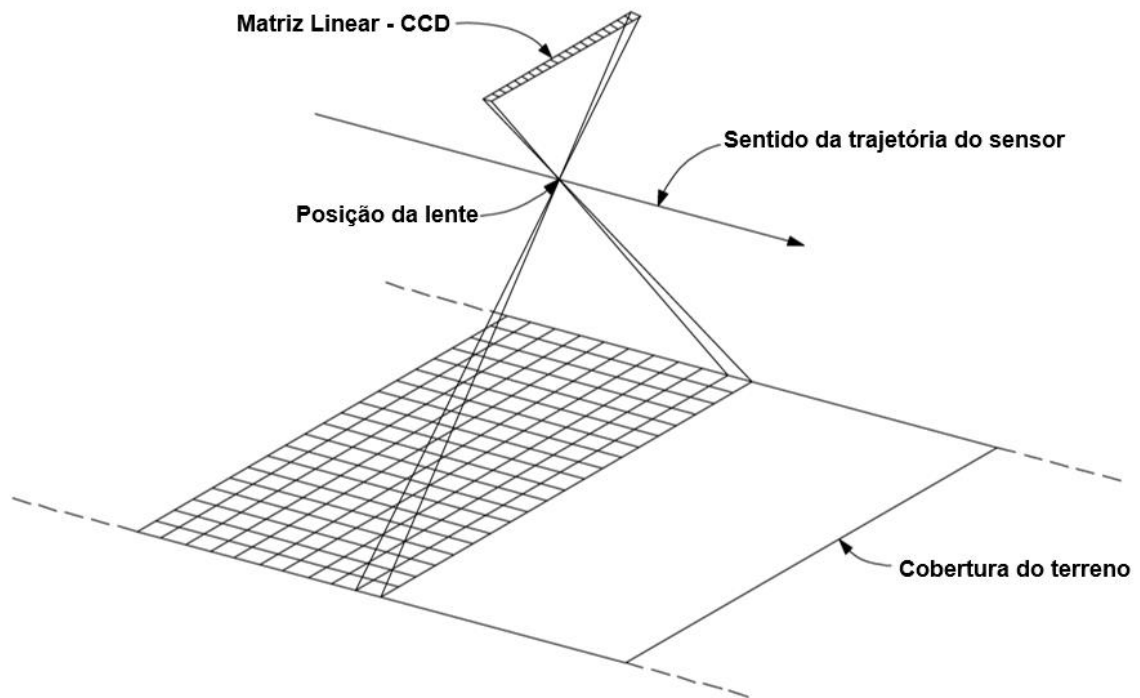
Fonte: Jensen (2009).

O registro das informações realizado pela energia refletida na superfície terrestre é realizado pelos sensores remotos em dispositivos eletrônicos integrantes do sistema e são conhecidos como Dispositivos de Carga Acoplada - CCD (*Charge-Coupled Devices*). O CCD é um dispositivo eletrônico pontual, que pode ser disposto segundo uma linha ou uma matriz cujos elementos (*pixels*) são sensibilizados com a energia radiante refletida que chega ao sensor, registrando-se em cada elemento uma carga ou sinal elétrico que é convertido em valores digitais (WOLF; DEWITT, 2000).

A Figura 12 apresenta um esquema de como se distribuem os CCD's em uma linha (ou matriz linear) para registrar a radiação refletida pelos alvos localizados na

superfície terrestre. Com o movimento da plataforma, registra-se uma nova linha e assim sucessivamente até varrer toda área de interesse desejada.

Figura 12 - Esquema gráfico de registro da informação da superfície terrestre pelo CCD linear



Fonte: Wolf e Dewitt (2000).

Outro tipo de dispositivo de carga acoplada utilizado no registro da informação por sensores remotos passivos consiste no CMOS (*Complementary Metal Oxide Semi Conductor*). Sua função e funcionalidade é a mesma que o CCD, porém com um custo inferior e dissipando menos energia (PRATLONG et al., 2018).

Uma imagem multiespectral é o produto gerado no sensoriamento remoto utilizando sensores passivos. A energia radiante refletida e captada pelo sensor é dividida em comprimentos de onda específicos (bandas espectrais) que, na maioria dos casos são direcionadas para dispositivos de carga (CCD ou CMOS) sensíveis a uma banda específica (vermelho, verde, azul, por exemplo) para que ocorra o registro da energia na forma de número digital. Ao final, cada banda espectral irá gerar uma imagem monocromática que, quando combinadas geram uma imagem colorida (THEILER; CAI, 2003).

Conforme mencionado anteriormente, cada *pixel* registrado em cada uma das bandas que compõem uma imagem multiespectral contém um número digital que corresponde

aos valores de radiância (L) refletida na superfície e sensibilizada pelo sensor. A radiância é considerada a medida radiométrica mais precisa em sensoriamento remoto, sendo definida como o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido (estéreo-radiano) e área ($W.m^2.sr^{-1}$), não dependendo da distância ou do campo de visada (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

Em uma imagem multiespectral além das informações radiométricas registradas no imageamento realizado na área de interesse, traz também a identificação posicional e geométrica dos objetos, proporcionando uma rica utilização para este produto. Uma vez que as imagens multiespectrais são georreferenciadas, podem ser aplicados processos combinando as informações radiométricas e geométricas da imagem, permitindo estudos mais precisos e detalhados (THOMAS et al., 2008).

Como exemplo do emprego das imagens multiespectrais podemos citar a identificação de vegetação e de corpos d'água por meio do cálculo de índices como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDWI (*Normalized Difference Water Index*), respectivamente (BHANDARI; KUMAR; SINGH, 2015).

Podem ser utilizadas em estudos temporais por meio de técnicas de processamento digital de imagem (PDI) e, são muito utilizadas nos processos fotogramétricos para gerar modelos digitais de elevação (representação topográfica) ou então, ortofotocartas de alta resolução espacial que são largamente empregadas na identificação precisa de objetos, medições lineares, angulares e de área (SEIDL et al., 2011).

2.3.1 Batimetria *Multi-media*

A técnica da batimetria *multi-media* começou a ser investigada pelos pesquisadores Zaar (1948) e Rinner (1948). Seus estudos tratavam do comportamento da fotogrametria realizada em dois meios distintos (ar e água), sendo então denominada na época de “fotogrametria em dois meios” (*two-media photogrammetry*).

Os pesquisadores na época procuravam compreender os efeitos e a geometria da condição de colinearidade quando o feixe de luz passava da atmosfera (ar) para a água, uma vez que ocorre o desvio no feixe de luz, ou seja, o fenômeno da refração da luz (KOTOWSKI, 1988).

Foi constatado nos estudos realizados que havia uma grande interferência do efeito da refração da luz na posição planimétrica e de profundidade em medidas realizadas sobre corpos d'água, ou seja, nas regiões mais rasas as medidas de profundidade apresentavam um deslocamento aparente quando comparada com as medidas reais tomadas em campo (DIETRICH, 2017).

Com o passar dos anos, outros pesquisadores trouxeram contribuições (HÖLE, 1971; OKAMOTO; HÖHLE, 1972; GIRNDT, 1973). Esses autores tinham a ideia do desenvolvimento de um modelo matemático que levasse em consideração a alteração da condição de colinearidade, tendo como importância o desvio sofrido pelo raio de luz ao atravessar o ar para a água ou outros meios.

Neste modelo seriam utilizados como dados de entrada a orientação das imagens, coordenadas no espaço objeto, parâmetros definidores da posição e forma da superfície refringente bem como os índices de refração dos meios. Todos estes parâmetros seriam considerados como desconhecidos na fototriangulação, sendo então estimados no ajustamento (HARRIS; UMBACH, 1972).

Fryer e Kniest (1985) pôde concluir que o problema fundamental da fotogrametria, quando aplicado a objetos submersos em um corpo d'água, não apresenta solução se os ângulos de incidência do raio de luz forem diferentes quando propagados da água para o ar, ou seja, não existe como solucionar o efeito da correção da luz durante o processo de fototriangulação.

Nos mapeamentos batimétricos utilizando o MDE oriundo das imagens fotogramétricas, a correção dos efeitos da refração da luz é realizada em etapa posterior à fototriangulação tendo como princípio a Lei de *Snell* (WESTAWAY; LANE; HICKS, 2000).

Com o advento da fotogrametria digital, a batimetria *multi-media* é realizada na prática tendo como dado de entrada a nuvem de pontos fotogramétrica gerada pela correlação de imagens. Por mais que nas regiões de corpos d'água as imagens fotogramétricas não apresentem uma boa correlação no processo de busca de pontos homólogos nos pares estereoscópicos, é possível obter correlações entre os *pixels* nas imagens, principalmente para regiões mais rasas do corpo d'água, obtendo uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais.

A busca pelos pontos homólogos durante a correlação de imagens é afetado por alguns fatores naturais que estão registrados nas imagens. Em regiões contendo nuvens, sombras, reflexo do sol na água (*sun-glint*), etc, os pontos fotogramétricos gerados apresentam altos valores de RMSE (*Root Mean Square Error*), devendo ser removidos no processo de ajustamento fotogramétrico do bloco.

Na literatura existem algumas variações nas técnicas da batimetria *multi-media*, porém, elas têm como base o cálculo dos valores para os deslocamentos aparentes nas coordenadas tridimensionais dos pontos gerados pela correlação de imagens, utilizando a lei de *Snell*.

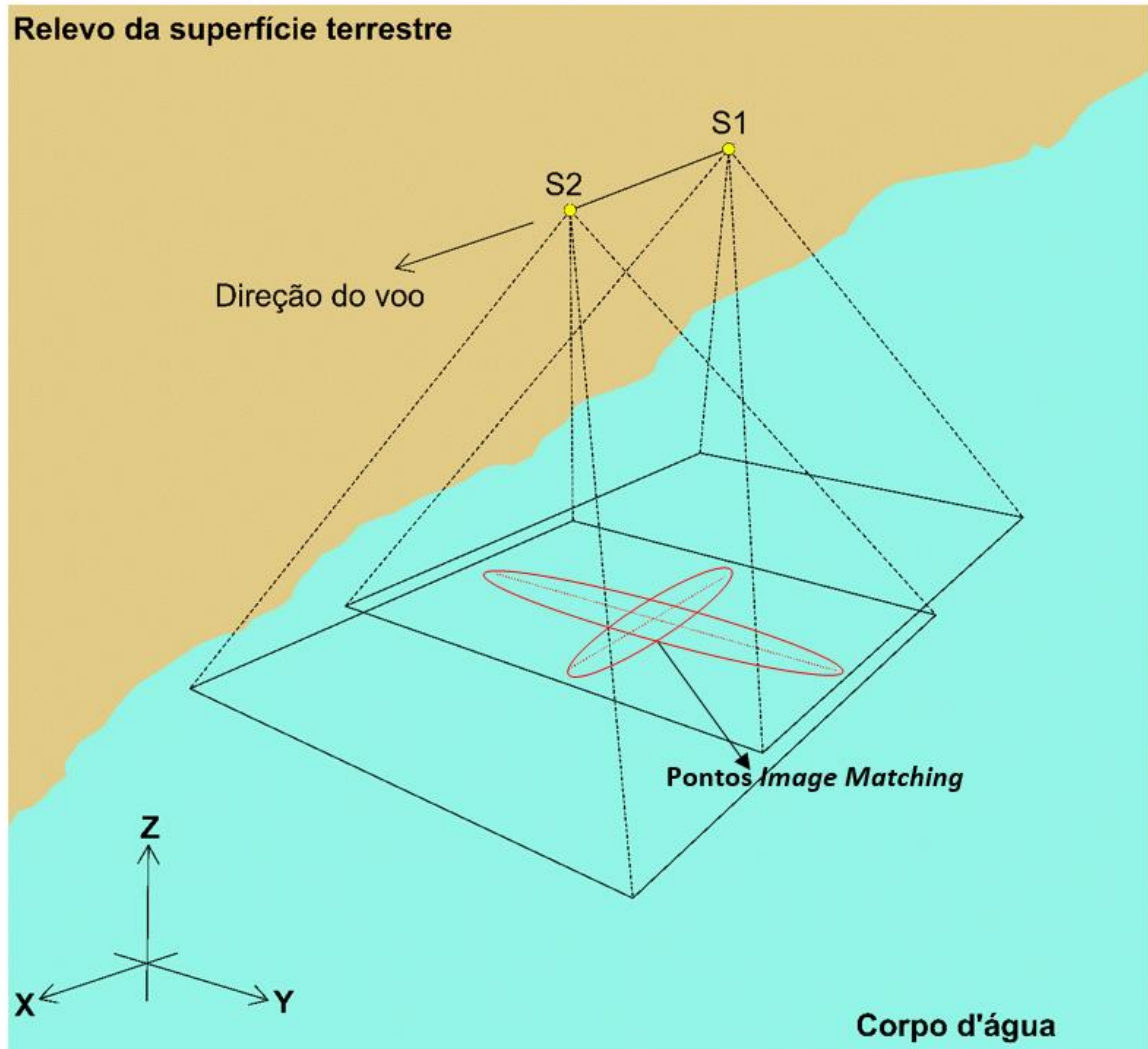
A descrição morfológica da batimetria *multi-media* nesta tese segue as formulações e os embasamentos teóricos trazidos por Murase et al. (2008). A metodologia será descrita considerando o que ocorre em um par estereoscópico referente à geometria para um raio de luz incidindo em um ponto localizado em um corpo d'água. A geometria na Figura 13 é semelhante ao que foi descrito nos trabalhos de Fryer e Kniest (1985) e Butler et al. (2002) e descreve a correção do deslocamento aparente para os pontos localizados na mesma direção do voo e perpendiculares a ele.

Na Figura 13 tem-se a representação de um estereopar, com dois centros perspectivos (S1 e S2), com imagens tomadas sobre uma região rasa de um corpo d'água. Foram aplicados os processos fotogramétricos que, pela correlação de imagens, originaram a uma nuvem fotogramétrica de pontos com coordenadas X, Y, Z representando a topografia submersa.

Para estes pontos devem ser calculadas e aplicadas as correções dos deslocamentos aparentes ocasionados pela refração da luz, para que eles possibilitem uma correta representação tridimensional do relevo submerso.

Visando uma melhor compreensão do comportamento de algumas variáveis na técnica de batimetria *multi-media* descrita, vamos dividir os pontos fotogramétricos em dois conjuntos: os que estão localizados no mesmo sentido do voo (caso 1) e os que são perpendiculares à sua trajetória (caso 2). Também será discutido o caso 3 que traz uma situação em que não existe uma solução única para correção dos deslocamentos aparentes sobre os pontos fotogramétricos.

Figura 13 - Estereopar fotogramétrico com correlação de imagens realizado sobre um corpo d'água. Os pontos gerados são utilizados para descrever a correção dos deslocamentos aparentes nas coordenadas X, Y, Z



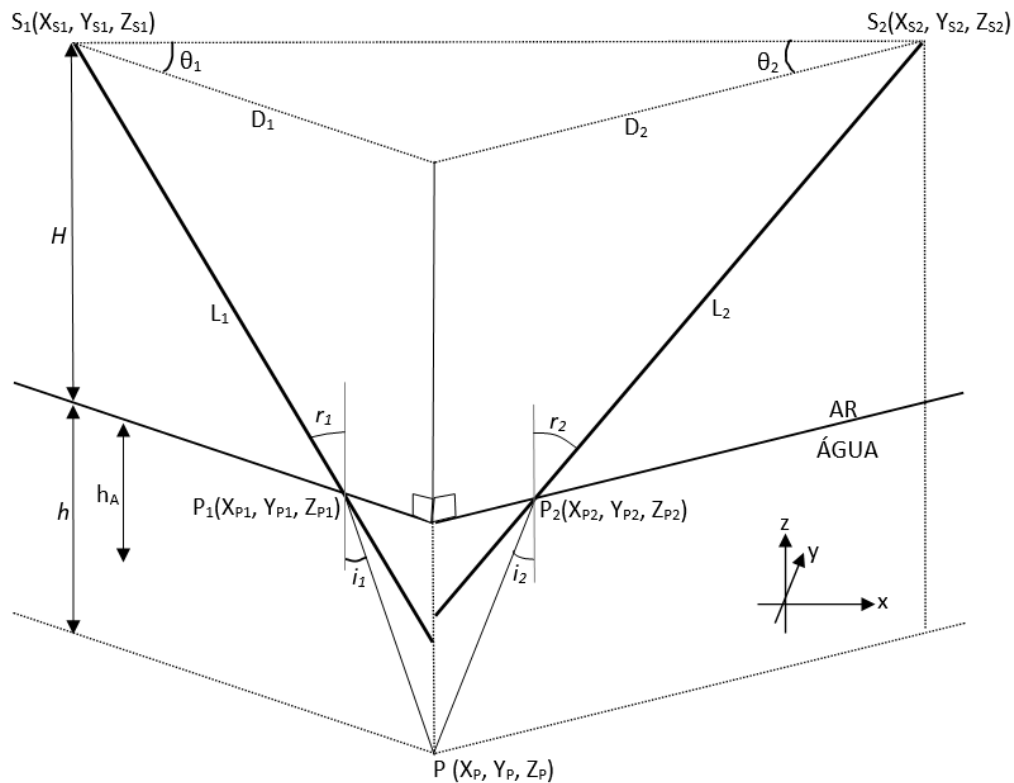
Fonte: Adaptado de Murase et al. (2009).

Os deslocamentos encontrados nas coordenadas planialtimétricas dos pontos fotogramétricos obedecem à Lei de *Snell*, que pode ser escrita de acordo com a Equação (2.2). Nesta equação, que descreve a *Lei de Snell* em um único feixe de luz, temos que n_1 e n_2 são, respectivamente, os índices de refração na água e no ar (considerado como sendo ~ 1), enquanto i representa o ângulo de incidência e r o ângulo de refração.

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin r_1 \quad (2.2)$$

A Figura 14 apresenta a descrição da geometria de um ponto no relevo submerso visto em duas imagens sobrepostas (estereopar) e os elementos envolvidos, conforme apresentado em Fryer e Kniest (1985).

Figura 14 - Geometria envolvida na batimetria *multi-media* descrita para um ponto submerso visto em duas imagens (estereopar)



Fonte: Adaptado de Fryer e Kniest (1985).

Na Figura 14 são apresentados os seguintes elementos:

- $S_1(X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1})$ e $S_2(X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2})$: coordenadas planialtimétricas dos dois centros perspectivados das imagens;
- $P_1(X_{P1}, Y_{P1}, Z_{P1})$ e $P_2(X_{P2}, Y_{P2}, Z_{P2})$: coordenadas planialtimétricas da posição na superfície d'água em que o feixe de luz muda de meio de propagação (água para ar);
- $P(X_P, Y_P, Z_P)$: coordenada planialtimétrica verdadeira do ponto no relevo submerso;
- i_1 e i_2 : ângulos de incidência do feixe de luz se propagando do ponto no relevo submerso em direção a S_1 e S_2 em relação à reta normal, respectivamente;
- r_1 e r_2 : ângulos de refração do feixe de luz propagado do ponto no relevo submerso em direção a S_1 e S_2 em relação à reta normal, respectivamente. O desvio ocorre quando o feixe de luz sai da água passando a se propagar no ar;

- H: altura de voo (distância entre o sensor à superfície da água);
 - h_A : profundidade aparente do ponto no relevo submerso;
 - h: profundidade verdadeira do ponto no relevo submerso;
 - L_1 e L_2 : distância entre os centros perspectivos das imagens (S1 e S2) e a projeção aparente do ponto no relevo submerso;
 - θ_1 e θ_2 : ângulos de separação formado entre o alinhamento dos centros perspectivos das imagens (S1 e S2) e a direção de onde se encontra o ponto no relevo submerso;
- e
- D_1 e D_2 : distância entre os centros perspectivos das imagens (S1 e S2) até a projeção do ponto no relevo submerso, considerando os ângulos θ_1 e θ_2 .

Pelo apresentado na Figura 14, um ponto na topografia submersa está presente em duas imagens sendo descrito no estereopar por dois feixes de luz que sensibilizam o sensor quando nas posições S1 e S2. Assim, para um único ponto fotogramétrico podemos aplicar duas vezes a Lei de *Snell*:

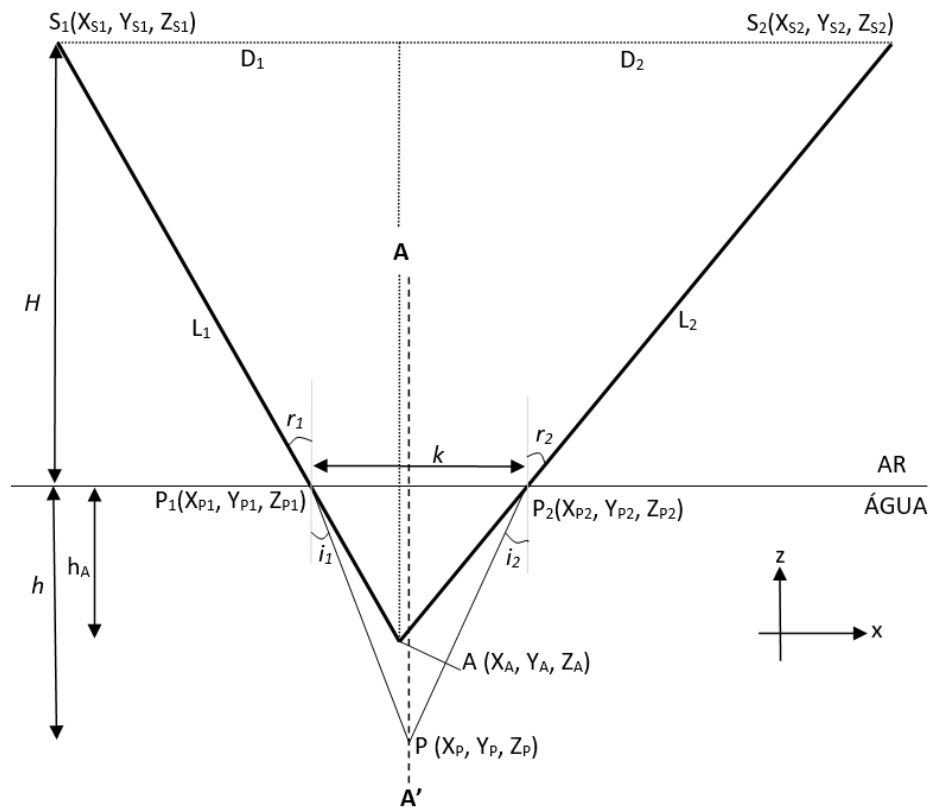
$$i_{S1} = \sin^{-1} \left(\frac{\sin r_{S1}}{n_1} \right) \quad (2.3)$$

$$i_{S2} = \sin^{-1} \left(\frac{\sin r_{S2}}{n_1} \right) \quad (2.4)$$

Nas Equações 2.3 e 2.4 a variável n_1 corresponde ao índice de refração da luz na água.

O caso 1 considera a geometria dos pontos fotogramétricos dispostos no mesmo sentido do voo, não havendo deslocamento aparente no sentido do eixo Y, ou seja, a coordenada Y do ponto na posição aparente (Y_A) coincide com a posição verdadeira (Y_P). A geometria das imagens e dos feixes de luz nesta condição é ilustrado pela Figura 15.

Figura 15 - Geometria de um ponto fotogramétrico no relevo submerso analisado na direção do voo
(caso 1)



Fonte: Adaptado de Fryer e Kniest (1985).

Na Figura 15 temos que o ponto A' corresponde à posição verdadeira do ponto localizado no relevo submerso enquanto A indica a posição conhecida e deslocada (em X e Z). A distância entre os pontos na superfície da água (P_1 e P_2) onde os feixes de luz passaram do ar para água é representada pela letra k .

O valor de k (Equação 2.5) pode ser calculado a partir dos ângulos de incidência (i_1 e i_2) e refração (r_1 e r_2) nos triângulos P_1AP_2 e P_1PP_2 .

$$k = (\tan r_1 + \tan r_2) \cdot h_A = (\tan i_1 + \tan i_2) \cdot h \quad (2.5)$$

Trabalhando a Equação 2.5 é possível calcular a profundidade verdadeira (h) do ponto P em função da profundidade aparente (h_A) dos ângulos de incidência e refração (Equação 2.6).

$$h = \left(\frac{\tan r_1 + \tan r_2}{\tan i_1 + \tan i_2} \right) \cdot h_A \quad (2.6)$$

Os valores dos ângulos de refração (r_1 e r_2) podem ser calculados resolvendo o triângulo S_1AS_2 , dado que são conhecidos *a priori* os elementos D_1 e D_2 , H e h_A . As

Equações 2.7 e 2.8 trazem a formulação matemática para o cálculo dos ângulos de refração.

$$\tan r_1 = \frac{D_1}{(H + h_A)} \quad (2.7)$$

$$\tan r_2 = \frac{D_2}{(H + h_A)} \quad (2.8)$$

Para determinar os valores dos ângulos de incidência (i_1 e i_2), vamos considerar as Equações 2.3 e 2.4, aplicando a função tangente aos dois lados da igualdade. Assim, obtém-se as Equações 2.9 e 2.10 para o cálculo dos ângulos de incidência a partir da função tangente.

$$\tan i_1 = \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{\sin r_1}{n_1} \right) \right) \quad (2.9)$$

$$\tan i_2 = \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{\sin r_2}{n_1} \right) \right) \quad (2.10)$$

Os elementos $\sin r_1$ e $\sin r_2$ presentes nas Equações 2.9 e 2.10 são calculados pela solução do triângulo S_1AS_2 , desta maneira, as Equações 2.9 e 2.10 podem ser escritas em função dos elementos D_1 , D_2 , L_1 e L_2 , sendo escritas de acordo com as Equações 2.11 e 2.12.

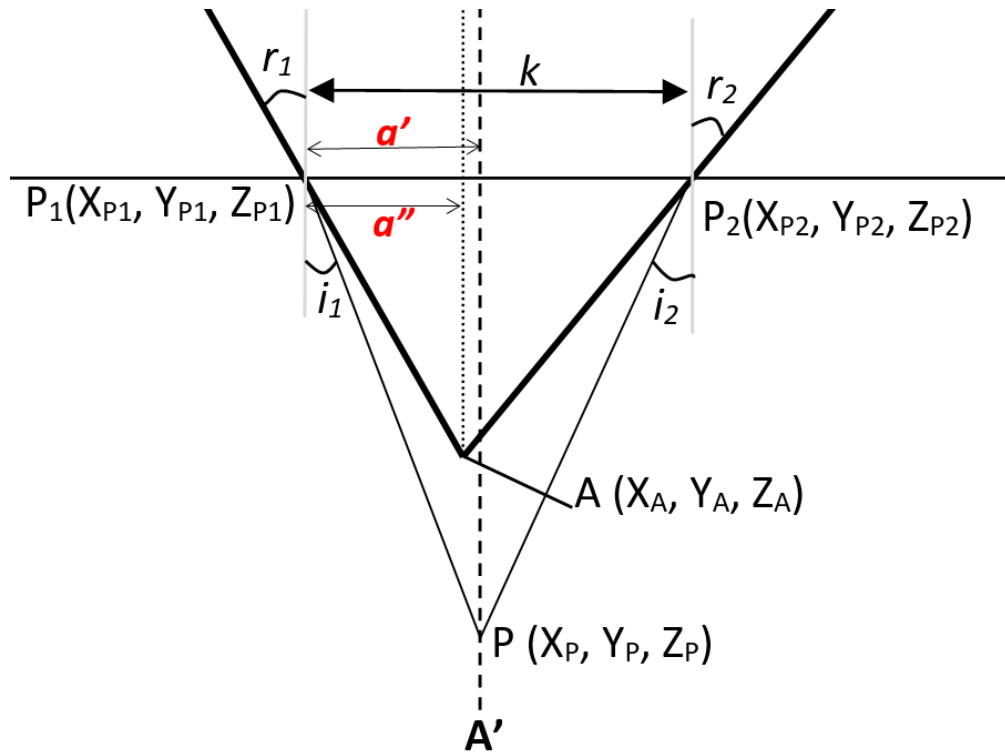
$$\tan i_1 = \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{\frac{D_1}{L_1}}{n_1} \right) \right) \quad (2.11)$$

$$\tan i_2 = \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{\frac{D_2}{L_2}}{n_1} \right) \right) \quad (2.12)$$

Diante do apresentado até o momento, nas Equações 2.7 a 2.12, foram determinados todos os elementos utilizados para o cálculo da profundidade verdadeira (Equação 2.6).

Para finalizar a solução da correção da refração da luz no caso 1, o próximo passo consiste no cálculo da coordenada X_P . Para o cálculo desta coordenada vamos tomar como referência o disposto na Figura 16 que traz os elementos a' e a'' .

Figura 16 - Apresentação das variáveis a' e a'' na geometria envolvida no caso 1



Fonte: Adaptado de Fryer e Kniest (1985).

Os elementos a' e a'' são calculados de acordo com as Equações 2.13 e 2.14, respectivamente.

$$a' = \tan i_1 \cdot h \quad (2.13)$$

$$a'' = \tan r_1 \cdot h_A \quad (2.14)$$

A coordenada de X_P , pode ser calculada em função da coordenada X_{P1} e a distância a' - Equação 2.15.

$$X_p = X_{P1} + \tan i_1 \cdot h \quad (2.15)$$

Outra maneira de calcular a coordenada X_P está relacionada com a coordenada X_A e a diferença entre a' e a'' , sendo esta apresentada pela Equação 2.16, que substituindo nas Equações 2.13 e 2.14, leva à Equação 2.17.

$$X_p = X_A + (a' - a'') \quad (2.16)$$

$$X_p = X_A - h_A \cdot \tan r_1 + h \cdot \tan i_1 \quad (2.17)$$

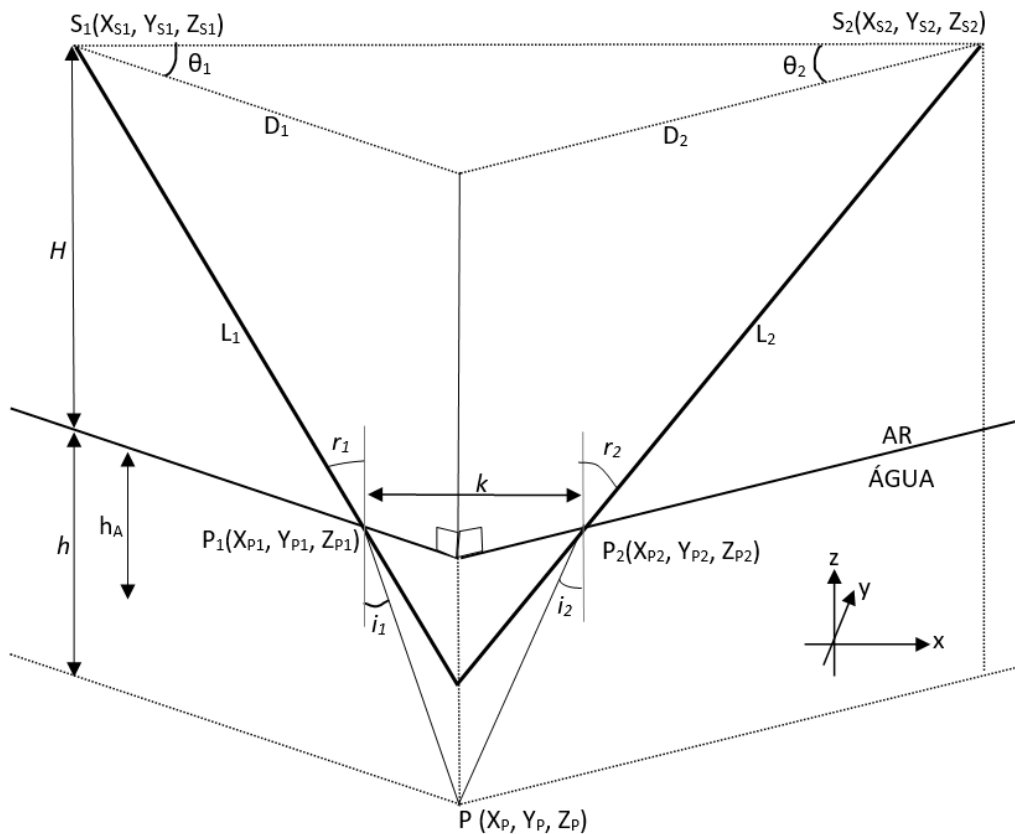
Como a profundidade de P é calculada pela Equação 2.6, esta pode ser substituída na Equação 2.17, obtendo a equação final para o cálculo da coordenada X_P (Equação

2.18), encerrando a abordagem matemática envolvida na correção dos deslocamentos aparentes no Caso 1.

$$X_p = X_A + \frac{h \cdot (\tan r_2 \cdot \tan i_1 - \tan r_1 \cdot \tan i_2)}{\tan r_1 + \tan r_2} \quad (2.18)$$

No caso 2, representado pela Figura 17, o ponto avaliado está localizado na direção perpendicular à direção do voo. Assim, temos que os ângulos de incidência e refração são os mesmos nas duas câmeras ($i_1 = i_2$ e $r_1 = r_2$) e, são coincidentes $X_A = X_P$ e $Y_A = Y_P$.

Figura 17 - Geometria de um ponto fotogramétrico no relevo submerso com localização na direção perpendicular ao voo (caso 2)



Fonte: Adaptado de Fryer e Kniest (1985).

Como o caso 2 envolve o cálculo apenas da profundidade verdadeira (h), esta pode ser determinada por meio dos raios de luz incidente para a câmera nas posições S1 e S2 (Equação 2.19).

$$h = \frac{\tan r_1}{\tan i_1} \cdot h_A = \frac{\tan r_2}{\tan i_2} \cdot h_A \quad (2.19)$$

Se substituirmos as Equações 2.7, 2.8, 2.11 e 2.12 na Equação 2.19, obtém-se o valor da profundidade verdadeira para o ponto estudado no caso 2.

O Caso 3 apresentado pelos autores conforme ilustrado na Figura 14, está relacionado com o fato de que se dá a não coincidência dos feixes de luz incidentes nas posições S1 e S2 das câmeras. Para este caso, o mapeamento batimétrico só é possível por meio de uma aproximação das posições encontradas, pois teoricamente não existe solução para a posição observada.

Nos casos 1 e 2 descritos anteriormente, a diferença observada nas posições verdadeira e aparente para um ponto submerso é pequena, considerando a altitude do avião de 3000 m e a distância entre os dois centros perspectivos de 1000 m. Nestes moldes, a diferença apresentada por Fryer e Kniest (1985) e Butler et al. (2002) podem ser negligenciadas. Partindo desta premissa e considerando a geometria da Figura 14, que traz valores diferentes para os ângulos e incidência (i_1 e i_2), o valor da profundidade verdadeira pode ser determinado conforme o descrito por Tewinkel (1963).

A variável k corresponde à distância entre P1 e P2. Analisando a geometria dos triângulos envolvidos, ela pode ser calculada pela Equação 2.20.

$$k = (\tan r_1 \cdot \cos \theta_1 + \tan r_2 \cdot \cos \theta_2) \cdot h_A = (\tan i_1 \cdot \cos \theta_1 + \tan i_2 \cdot \cos \theta_2) \cdot h \quad (2.20)$$

A Equação 2.21 apresenta o valor da variável profundidade verdadeira isolada na igualdade entre as expressões mostradas na Equação 2.20.

$$h = \left(\frac{\cos \theta_1 \cdot \tan r_1 + \cos \theta_2 \cdot \tan r_2}{\cos \theta_1 \cdot \tan i_1 + \cos \theta_2 \cdot \tan i_2} \right) \cdot h_A \quad (2.21)$$

Para que a solução apresentada na Equação 2.21 seja possível, é necessário conhecer os elementos $\cos \theta_1$ (Equação 2.22) e $\cos \theta_2$ (Equação 2.23).

$$\cos \theta_1 = \frac{(X_A - X_{S1})}{D_1} \quad (2.22)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{(X_{S2} - X_A)}{D_2} \quad (2.23)$$

Ainda para Murase et al. (2008), a implementação dos 3 casos apresentados na batimetria *multi-media*, permite a obtenção de um modelo batimétrico preciso para a determinação da topografia em águas rasas.

Além da metodologia descrita por Murase et al. (2008), na literatura são encontradas outras abordagens para a batimetria *multi-media* envolvendo uma morfologia matemática para correção apenas do deslocamento aparente na profundidade, por exemplo em Dietrich (2017). Este método envolve uma abordagem matemática menos complexa, porém, necessita de uma grande redundância de imagens para uma mesma área (câmera acoplada em UAV), com diferentes ângulos de visada. No trabalho apresentado pelo autor, a técnica foi testada em um ambiente controlado (piscina inflável com cascalho ao fundo) e em trecho de um rio com água bastante limpa. Os resultados se mostraram satisfatórios para profundidades de até 0,25 m para o experimento na piscina e de até 1,20 m na prática real.

Diante do descrito nesta seção, podemos dizer que a aplicação da batimetria *multi-media* exige uma abordagem meticulosa e sofisticada. Cabe reforçar que as condições ambientais, como turbidez da água e interferências naturais, requerem ajustes constantes na técnica o que torna o processo dinâmico.

Esta técnica de batimetria por imagens representa uma inovação significativa no campo da pesquisa subaquática. A metodologia empregada na topográfica em corpos d'água não apenas melhora a precisão e resolução dos dados coletados, mas também expande as possibilidades de exploração em diferentes contextos submersos, principalmente em águas rasas.

2.3.2 Batimetria Multiespectral

A batimetria multiespectral, como o próprio nome sugere, requer a utilização de “*n*” bandas espectrais, correlacionadas entre si por meio de um modelo matemático, utilizando a informação da radiância atmosférica registrada pelo sensor para estimar as medidas de profundidades em corpos d'água.

O fundamento desta técnica baseia-se no princípio da interação da radiação eletromagnética com a água e o fundo topográfico. A energia incidente é refletida pela topografia submersa, sendo registrada pelos sensores multiespectrais. Esta energia refletida é influenciada pela profundidade e pelas propriedades do meio aquático.

Lyzenga (1981) e Philpot (1989) destacaram-se como pioneiros na técnica de batimetria multiespectral. Lyzenga (1981) realizou seus estudos combinando informações de várias bandas espectrais com o objetivo de obter um índice de profundidade que não apresentasse variação. Neste estudo, os parâmetros de entrada necessários eram as razões dos coeficientes de atenuação da água para cada uma das bandas espectrais utilizadas.

Philpot (1989) apresentou um modelo matemático que poderia ser empregado para batimetria óptica onde todos os parâmetros, exceto a profundidade, são dependentes do comprimento de onda (Equação 2.24). Este modelo assume que todas as propriedades da água são homogêneas em todas as direções e, apesar de não ser verdade, é considerado como um ponto de partida.

$$L_d = L_b \exp(-gz) + L_w \quad (2.24)$$

Onde:

L_d = Radiância observada pelo sensor;

L_b = Radiância da banda que tem sensibilidade ao fundo topográfico;

g = Coeficiente de atenuação da radiância na água;

z = Profundidade da coluna d'água; e

L_w = Radiância observada em uma região de água profunda.

Lyzenga, Malinas e Tanis (2006) trouxeram uma evolução da técnica da batimetria multiespectral apresentando um modelo Logarítmico Linear (*Log-Linear Model*) que parte do princípio de que a radiação eletromagnética no corpo d'água pode ser representada por uma função linear de reflectância do fundo topográfico e a profundidade por meio de uma função exponencial.

Os autores utilizam em seu trabalho o método do albedo independente (coeficiente de reflexão) para obter um modelo batimétrico a partir de uma imagem multiespectral,

considerando que a atenuação da luz em um corpo d'água ocorre segundo uma variação exponencial.

A Equação 2.25 apresenta o modelo matemático Log-Linear proposto por Lyzenga, Malinas e Tanis (2006).

$$\hat{Z} = h_0 + \sum_{j=1}^N h_j \ln(Lb_j - \overline{Lb_j^\infty}) \quad (2.25)$$

Onde:

\hat{Z} = Valores de profundidade calculados;

h_0, h_j = Coeficientes determinados por meio da regressão linear para cada banda espectral utilizada no modelo;

Lb_j = Valores de radiância na banda espectral j; e

$\overline{Lb_j^\infty}$ = Valor médio da radiância na banda j para uma região de grande profundidade no corpo d'água.

Na Equação 2.25 tem-se que o modelo matemático relaciona o valor da radiância em "N" bandas espectrais com a profundidade real do corpo d'água, por meio de uma amostragem realizada *in locu*.

Outra variação da batimetria multiespectral pode ser encontrada no trabalho de Stumpf, Holderied e Sinclairs (2003). Na modelagem trazida pelo autor é utilizada uma transformação logarítmica para linearizar a relação entre a radiância da banda espectral e a profundidade. Neste modelo é utilizado um par de bandas para diminuir a quantidade de parâmetros e estimar as profundidades.

Como as bandas são igualmente distribuídas, os erros ocasionados pela variação da radiação na atmosfera, coluna d'água e fundo topográfico são minimizados (PUSHPARAJ; HEGDE, 2017).

A Equação 2.26 traz o modelo proposto por Stumpf, Holderied e Sinclairs (2003), utilizado para estimar as profundidades em águas rasas.

$$\hat{Z} = h_1 \frac{\ln(n(Lb_i))}{\ln(n(Lb_j))} - h_0 \quad (2.26)$$

Onde:

\hat{Z} = Valores de profundidade a serem calculados;

h_0, h_1 = Coeficientes determinados pela regressão linear;

n = Valor constante escolhido para manter a razão positiva para qualquer valor de reflectância;

Lb_i = Radiância observada na banda espectral i ; e

Lb_j = Radiância observada na banda espectral j .

Segundo Kibele e Shears (2016), a técnica de batimetria multiespectral vem mostrando uma disseminação e utilização na comunidade científica devido a algumas vantagens, merecendo destaque:

- Cobertura espacial ampliada: os modelos matemáticos empregados permitem estimar a batimetria em extensas áreas, especialmente quando aplicados a imagens de satélite.
- Menor custo em grandes áreas: em comparação com levantamentos batimétricos tradicionais, o uso de imagens de sensoriamento remoto pode ser mais econômico para grandes áreas.
- Menor impacto ambiental: já que não é necessário operar embarcações ou equipamentos no local, o impacto ambiental é geralmente menor.
- Acesso a áreas difíceis: permite a obtenção de dados batimétricos em áreas de difícil acesso ou em locais onde o levantamento *in locu* pode ser arriscado ou impraticável.
- Atualização frequente: dada a revisita regular de muitos satélites, é possível obter atualizações frequentes da batimetria (estudos temporais para monitoramento), especialmente útil para áreas muito dinâmicas.

Ainda segundos os autores, como desvantagens da técnica de batimetria multiespectral tem-se:

- Resolução espacial: dependendo do sensor utilizado, a resolução espacial pode ser mais baixa em comparação com os métodos tradicionais, trazendo um modelo batimétrico mais generalizado.

- Necessidade de dados de calibração: para desenvolver e validar os modelos, são frequentemente necessários dados batimétricos *in locu*, que podem ser caros ou difíceis de obter.
- Complexidade de processamento: a correção atmosférica, a compensação da superfície da água e outras etapas de processamento são necessárias antes da aplicação dos modelos.

Para Lyzenga, Malinas e Tanis (2006), não diferente de qualquer técnica apresentada, a batimetria multiespectral apresenta algumas limitações, as quais merecem destaque:

- Águas turvas: a técnica apresenta maior eficiência em águas claras. Em águas turvas, a penetração da luz é limitada, tornando a inferência batimétrica difícil ou impossível.
- Profundidade máxima: a capacidade de inferir profundidade diminui à medida que a profundidade aumenta. Normalmente, é mais eficaz em águas rasas (por exemplo, menos de 20-30 metros, dependendo da clareza da água).
- Influência do tipo de fundo: variações no albedo do fundo (por exemplo, entre areia, rocha e vegetação) podem afetar a refletância e, portanto, as estimativas de profundidade.
- Efeitos da superfície da água: ondulações, espuma e outros efeitos da superfície podem complicar a interpretação das refletâncias.

3 REFLEXÃO ESPECULAR EM CORPOS D'ÁGUA (*SUN-GLINT*)

Um dos maiores desafios no imageamento aéreo ou orbital em corpos d'água está diretamente relacionado à ocorrência de reflexão especular, registrado durante o imageamento na forma de *sun-glint*.

O efeito *sun-glint* traz algumas problemáticas no imageamento realizado. As imagens apresentam um brilho intenso e excessivo, tornando difícil a visualização e análise de características aquáticas e de outros objetos presentes na superfície da água. Isso reduz também o contraste das imagens bem como aumenta a distorção de cores devido ao reflexo da luz solar (Figura 18).

Figura 18 – Exemplo da ocorrência do efeito *sun-glint* em um corpo d'água formando um caminho cintilante

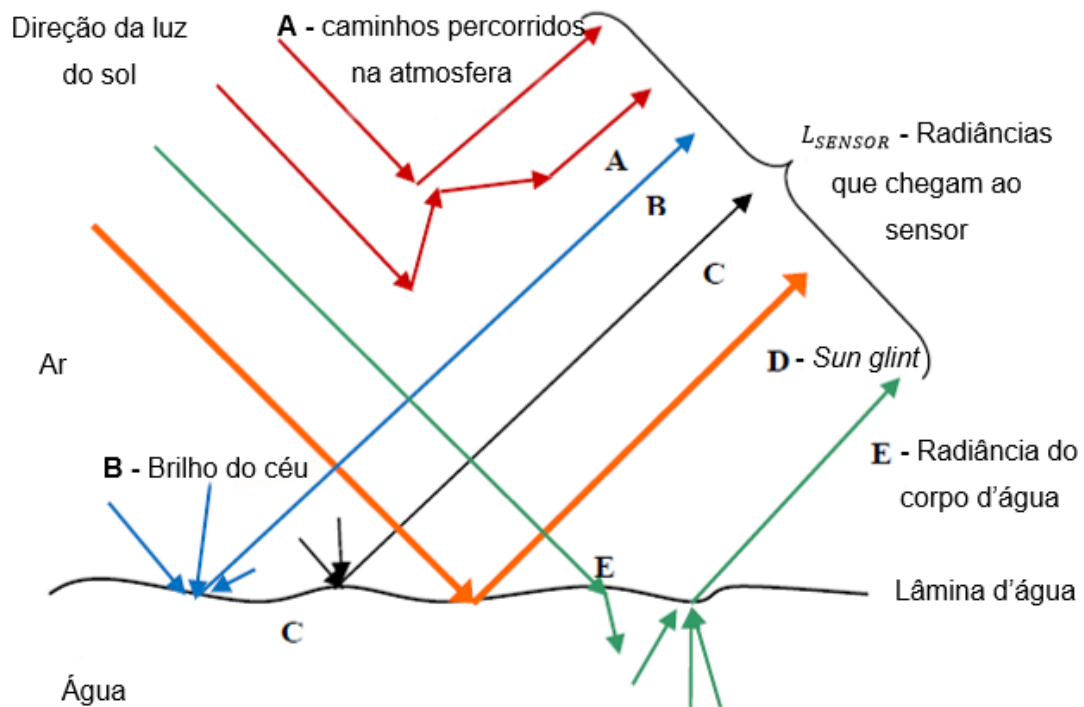


Fonte: European Space Agency - ESA.

Em técnicas de *machine learning* e processamento digital de imagens, a ocorrência do efeito *sun-glint* pode introduzir ruídos e variabilidades que confundem os algoritmos utilizados gerando resultados errôneos.

Em sensoriamento remoto, o valor da radiância (L) incidente em um corpo d'água e registrada pelo sensor pode percorrer diferentes caminhos (Figura 19).

Figura 19 - Caminhos percorridos pela radiância incidente em corpos d'água antes de serem registradas pelo sensor



Fonte: Adaptado de Kay, Hedley e Lavender 2009.

Pela Figura 19, a radiância que percorre a trajetória descrita em **A** é resultado de um espalhamento (simples ou múltiplo) ocorrido na atmosfera por partículas de aerossóis. Em **B** tem-se o espalhamento da atmosfera ocorrido na superfície da água, sendo sua reflexão registrada pelo sensor. O caminho percorrido pela radiância na direção **C** consiste na reflexão das “espumas” formadas pelas ondas quando o corpo d'água se encontra agitado. Em **D** tem-se a reflexão especular da lâmina d'água, responsável pela ocorrência do efeito *sun-glint*. Por fim, a trajetória descrita em **E** refere-se a radiância transmitida através da atmosfera até o corpo d'água e seu posterior direcionamento ao sensor após ser refletida na coluna d'água.

O valor final da radiância que chega ao sensor (L_{SENSOR}) é o resultado da soma dos valores das radiâncias provenientes dos diferentes caminhos percorridos (Equação 3.1) descritos pela Figura 19.

$$L_{SENSOR} = L_{atm} + T.L_{céu} + T.L_{ondas} + T.L_{glint} + T.L_{água} \quad (3.1)$$

Onde:

L_{SENSOR} : consiste na radiância registrada pelo sensor;

L_{atm} : radiância que atinge o sensor após percorrer a atmosfera;

T : é a transmitância da atmosfera na direção do sensor; e

$L_{céu}$, L_{ondas} , L_{glint} , $L_{água}$: radiâncias localizadas no topo do corpo d'água que, após serem refletidas são direcionadas ao sensor.

O efeito *sun-glint* consiste no reflexo do sol na água e pode ser definido como uma reflexão especular que ocorre na superfície de um corpo d'água, com total transmissão da energia proveniente do sol, incidente na superfície e desta para o sensor, caracterizado por manchas brancas e brilhantes sobre o corpo d'água em que os *pixels* trazem altos valores radiométricos registrados (KAY; HEDLEY; LAVENDER, 2009).

Na literatura os trabalhos que versam sobre a aplicação da técnica de batimetria multiespectral reforçam a importância de uma preparação cuidadosa das imagens a serem utilizadas, sendo crucial a remoção ou atenuação do efeito *sun-glint* antes da execução da técnica. Caso estes efeitos não sejam tratados irá ocorrer um comprometimento da acurácia e confiabilidade dos dados utilizados no modelo.

A atenuação do efeito *sun-glint* nas imagens assegura que as informações radiométricas relevantes sejam preservadas, melhorando a qualidade dos dados de entrada e, por consequência, a precisão e robustez dos modelos gerados. Este procedimento é fundamental para maximizar o desempenho da técnica de batimetria multiespectral em estudos subaquáticos.

Até o presente momento não foram encontrados trabalhos na literatura que versem sobre a remoção/atenuação do efeito *sun-glint* em imagens multiespectrais aéreas bem como realização da correlação de imagens utilizando as imagens corrigidas.

Para remoção atenuação do efeito *sun-glint* em imagens multiespectrais são encontrados alguns algoritmos, destacando-se:

- Algoritmos baseados em polarização: esses algoritmos aproveitam o fato de que a luz refletida pela superfície da água é parcialmente polarizada. Câmeras equipadas com filtros polarizadores são usadas para capturar imagens que minimizam a intensidade da luz refletida (*sun-glint*), permitindo uma visão mais clara de características subaquáticas e melhorando a qualidade da imagem para análises subsequentes.

- Método de correção empírica: este método envolve a análise manual ou semiautomática das imagens para identificar padrões e características associados ao *sun-glint*. Com base nessa análise, ajustes e correções são aplicados empiricamente às imagens para reduzir seus efeitos, melhorando a precisão e a utilidade das imagens para interpretação e análise.
- Método de correção baseado em ângulo: leva em consideração o ângulo de incidência da luz solar e o ângulo de observação da câmera ao estimar e corrigir o efeito *sun-glint*. Ajustes são feitos nas imagens com base nesses ângulos para reduzir a predominância desta ocorrência nas observações.
- Métodos estatísticos e modelos de regressão linear: estes métodos utilizam abordagens estatísticas para modelar o efeito do *sun-glint* e aplicar correções. Através de técnicas como regressão linear e mínimos quadrados, o componente de *sun-glint* é estimado e subtraído das imagens, ajudando a isolar e minimizar seus efeitos.
- Algoritmos baseados em bandas espectrais: utilizando múltiplas bandas espectrais, esses algoritmos diferenciam o brilho causado pelo *sun-glint* do brilho inerente aos objetos na imagem. Com base nesta diferenciação, o efeito do *sun-glint* é atenuado, permitindo uma análise mais precisa das características da imagem.
- Métodos de filtragem e suavização: as técnicas de filtragem e suavização são aplicadas para reduzir os ruídos e artefatos causados pelo *sun-glint*. Esses métodos visam melhorar a clareza e a qualidade visual das imagens, facilitando a identificação e análise de características e objetos de interesse.
- Técnicas de *machine learning* e *deep learning*: estes algoritmos modernos, como redes neurais, são treinados para identificar e corrigir automaticamente o efeito do *sun-glint* nas imagens. Eles são capazes de aprender padrões complexos e aplicar correções sofisticadas, melhorando a qualidade e a utilidade das imagens para análises avançadas.

Segundo Lyzenga, Malinas e Tanis (2006), muitas vezes a atmosfera e as propriedades óticas são uniformes. Os ângulos solares e a geometria de visada encontram-se posicionadas de modo em que uma quantidade de luz solar é refletida no campo de visada, onde se encontra o sensor (câmera).

A atmosfera presente no campo de visada do sensor apresenta algumas flutuações tais como *sun-glint*, névoa, neblina ou variações na qualidade da água. Algumas destas variações podem ser corrigidas/atenuadas utilizando dados multiespectrais incluindo as informações captadas pela banda do infravermelho (NIR – *Near-Infrared*). Ainda para Lyzenga, Malinas e Tanis (2006), a luz do sol refletida diretamente para o sensor inclui um fator do comprimento de onda dependente (reflectância de Fresnel da superfície), intensidade espectral da luz do sol incidente e a inclinação da superfície da água quando a reflexão ocorre (declividade). O algoritmo utilizado para correção do *sun-glint* parte da premissa de que existe uma correlação entre o sinal do *sun-glint* com os comprimentos de onda de cada banda. O comprimento de onda dependente pode ser determinado a partir de uma amostra de água em uma região mais profunda contendo alguns padrões de *sun-glint* e calculando a covariância de cada uma das bandas em relação a banda do infravermelho (Equação 3.2).

$$\rho_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{in} L_{jn} - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{in} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{jn} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ_{ij} = covariância calculada entre as bandas i e j ;

N = quantidade de bandas da imagem que está trabalhando;

L_{in} = n ésima amostra de radiância na banda i ; e

L_{jn} = n ésima amostra da radiância na banda j (NIR).

Uma vez determinados os valores das covariâncias entre as bandas i e j é possível calcular o fator de correção do *sun-glint* (r_{ij}), conforme Equação 3.3.

$$r_{ij} = \frac{\rho_{ij}}{\rho_{jj}} \quad (3.3)$$

Por fim, é aplicada a correção do efeito *sun-glint* nas imagens contaminadas realizando a subtração do valor da radiância da banda que se deseja corrigir pelo valor da radiância da banda do infravermelho escalonado (Equação 3.4).

$$L'_i = L_i - r_{ij}(L_j - \bar{L}_j) \quad (3.4)$$

Onde:

L'_i = valor da radiância corrigido do efeito *sun-glint* para a banda i ;

L_i = valor da radiância antes da correção para a banda i ;

r_{ij} = fato de correção calculado entre as bandas i e j ;

L_j = valor da radiância na banda j (NIR); e

\bar{L}_j = valor médio da radiância na banda j (NIR);

É importante dizer que a banda do NIR é de fundamental importância para a correção/atenuação do efeito *sun-glint* nas imagens pois nela não existe dispersão de volume ou mudanças no sinal refletido do fundo do corpo d'água, e por este motivo tem-se que a correção realizada não altera a dependência com relação à profundidade.

A inovação central desta tese reside na remoção/atenuação do efeito *sun-glint* nas imagens aéreas individualizadas. Este procedimento tem por objeto melhorar a qualidade intrínseca das imagens capturadas para o reservatório como também otimizar a fase da correlação de imagens, obtendo uma nuvem de pontos mais precisa e refinada do reservatório.

Vale destacar que o procedimento de remoção/atenuação do efeito *sun-glint* nas imagens é comumente usado em trabalhos que versam sobre a técnica de batimetria multiespectral, não sendo encontrado na literatura uma abordagem da remoção do efeito *sun-glint* em imagens aéreas RGBNiR e posterior obtenção da nuvem de pontos fotogramétrica a ser utilizada na batimetria *multi-media*.

4 CASO PRÁTICO: BATIMETRIA *MULTI-MEDIA* APLICADA AO RESERVATÓRIO DE CACHOEIRA

Neste Capítulo, será apresentada uma caracterização da área de estudo desta pesquisa: o reservatório de Cachoeira (São Paulo – Brasil). Aqui, será apresentada cada fase do método desenvolvido e executado ao longo deste trabalho.

As questões problemáticas identificadas nas imagens aéreas que vieram a degradar a geração do modelo batimétrico serão apresentadas juntamente com as estratégias adotadas para mitigar suas influências, podendo ser considerada uma contribuição singular desta tese.

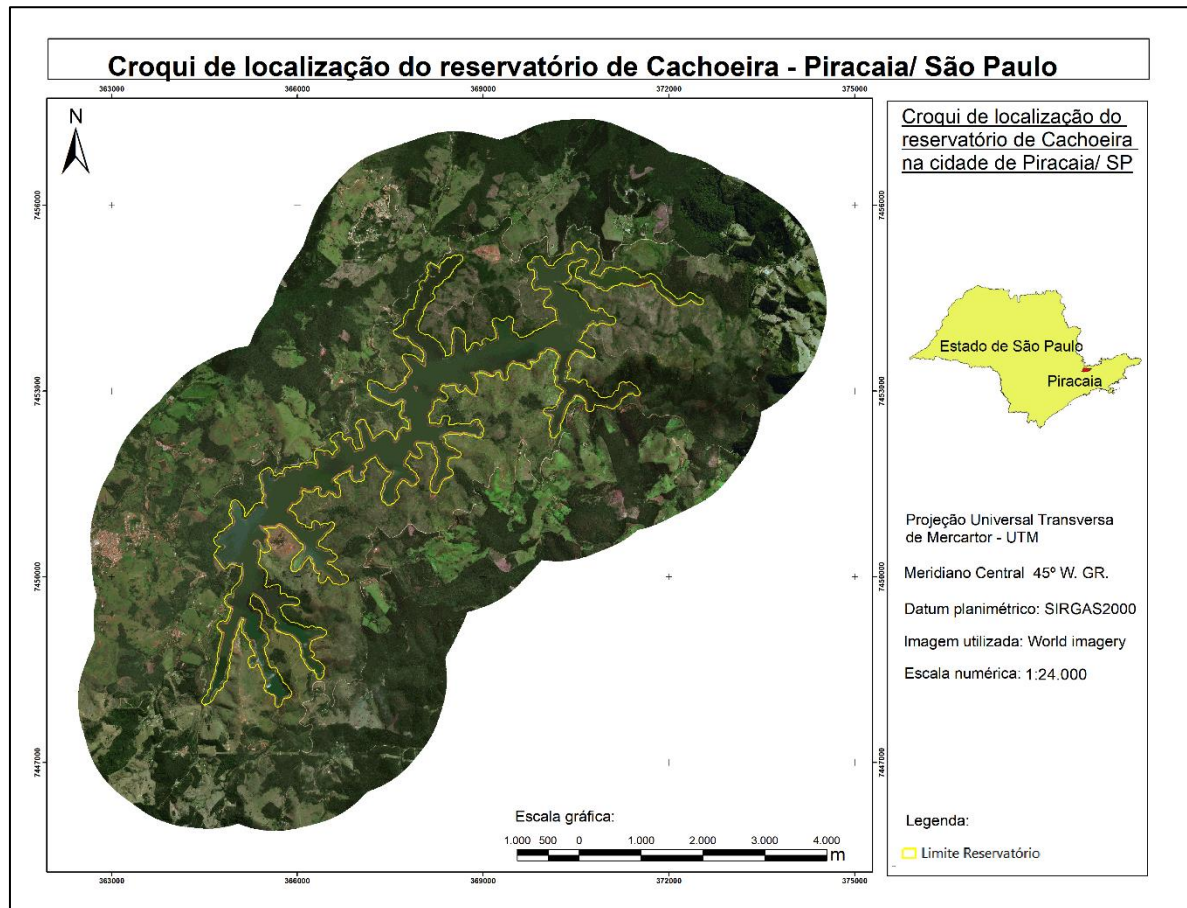
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O experimento realizado nesta pesquisa foi desenvolvido para a área do reservatório de Cachoeira, pertencente à bacia hidrográfica do rio Piracicaba, que está localizado no município de Piracaia (Estrada do Rio Cachoeira, km 2), São Paulo (Figura 20) que, juntamente com as represas de Jaguari, Jacareí, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras integram o Sistema Cantareira.

A construção do reservatório de Cachoeira iniciou-se no ano de 1966 sendo concluída e entrando em operação em novembro de 1974. Este reservatório possui um volume útil de 70,55 hm³ e volume de reserva de 44,05 hm³. No que se refere a área de inundação a máxima é de 8,7 km² e a mínima de 5,8 km² quando operando, respectivamente, nas cotas máxima normal de 821,78 m e mínima normal de 811,72 m (ANA, 2004).

O Sistema Cantareira é o maior conjunto de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo, sendo responsável pelo suprimento de água de grande parte da cidade (zonas norte, centro e partes da zona leste e oeste) e para os municípios de Franco da Rocha, Francisco Morato, Caieiras, Osasco, Carapicuíba, São Caetano do Sul e partes dos municípios de Guarulhos, Barueri, Taboão da Serra e Santo André (SABESP, 2019).

Figura 20 - Croqui de localização do reservatório de Cachoeira, área de estudo da tese



Fonte: O Autor.

O reservatório Cachoeira, assim como todo o Sistema Cantareira é de responsabilidade da Agência Nacional de Água (ANA) e do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) e a gestão operacional é realizada pela Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) por meio de outorga concedida para o uso dos recursos hídricos do Sistema Cantareira (ANA, 2019).

Como pode ser visto pela Figura 21, estas represas são interligadas por túneis subterrâneos e canais que, por meio da gravidade transferem água dos reservatórios Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha para o reservatório de Paiva Castro. Neste último existe uma estação elevatória (Santa Inês) que bombeia a água para o reservatório de Águas Claras a qual é direcionada para a estação de tratamento antes de abastecer a população (ANA, 2004).

Figura 21 - Esquema da localização, disposição e interligação das represas integrantes do Sistema Cantareira



Fonte: ANA (2004).

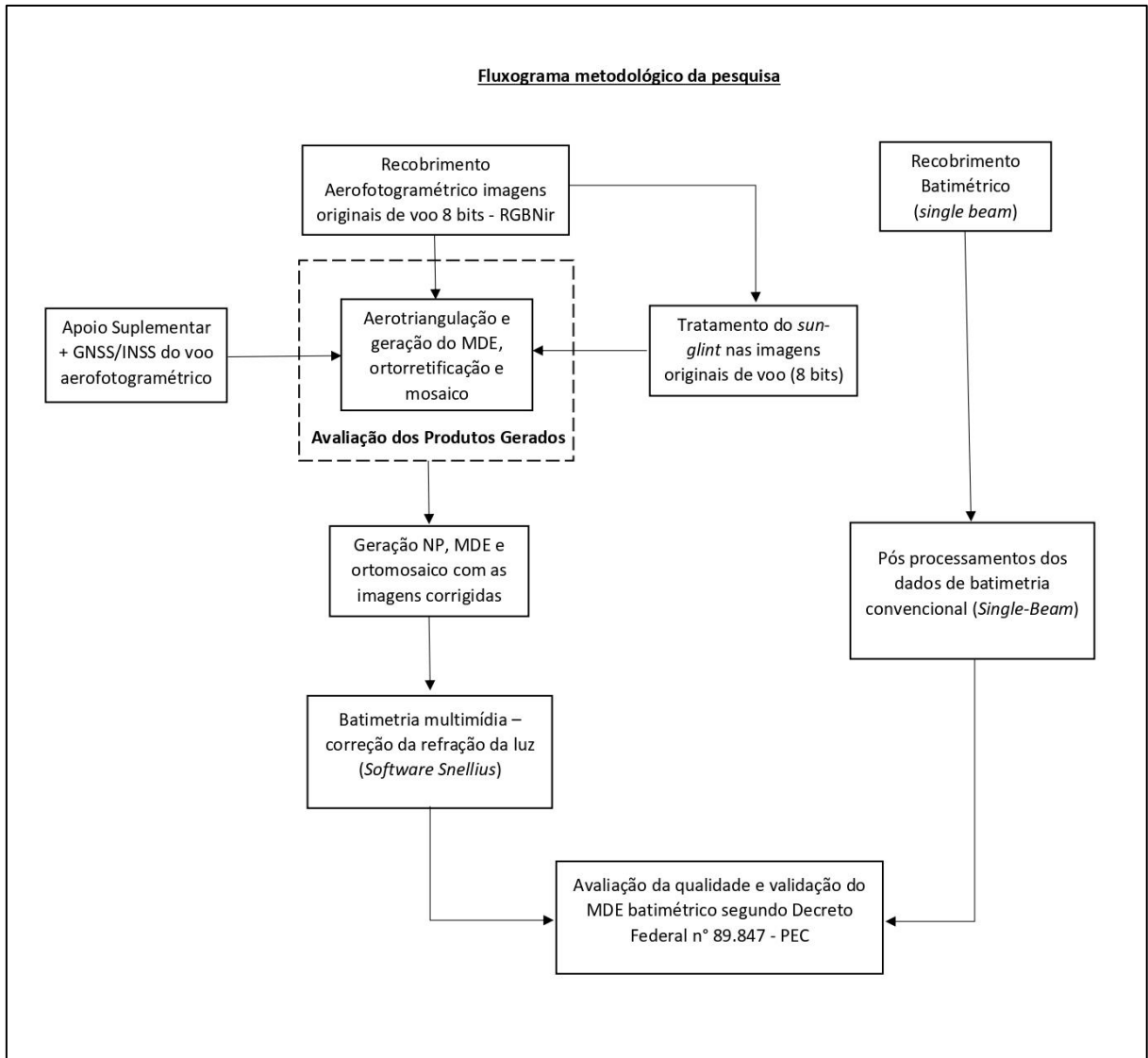
De acordo com a Agência Nacional de Água (ANA), o Sistema Cantareira entre os meses de outubro de 2013 e março de 2015 apresentou vazões naturais excepcionalmente baixas para essa época. Os reservatórios estavam recebendo um baixo volume de água devido à pouca quantidade de chuvas. Este fato fez que com que a ANA e DAEE estabelecessem condições operacionais complementares à operação do Sistema Cantareira, autorizando a SABESP a bombear água dos reservatórios de Jaguari, Jacareí e Atibainha, os quais já se encontravam com cotas inferiores a mínima operacional.

Mesmo com o bombeamento de água, durante todo o ano de 2014 e 2015, as vazões registradas foram bem menores que a média histórica desde o ano de 1930, ficando inclusive abaixo da pior vazão registrada no ano de 1953. Devido ao baixo volume de água durante o severo período de estiagem registrado nesses anos, outra medida foi tomada de modo a não prejudicar o abastecimento de água: foi autorizado a utilização da reserva técnica do Sistema Cantareira, popularmente conhecido como “volume morto”, que consiste em uma reserva de cerca de 480 bilhões de litros de água localizados abaixo das estruturas de operação dos reservatórios, sendo acessível apenas por bombeamento.

4.2. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico da pesquisa é introduzido por meio do fluxograma mostrado na Figura 22, seguido de uma breve contextualização de cada etapa.

Figura 22 - Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: O Autor.

Conforme pode ser visto no fluxograma da Figura 22, os dados de insumo para realização desta pesquisa são imagens multiespectrais tomadas com câmera aerofotogramétrica e dados de batimetria convencional coletados pelo *single-beam*. Este último conjunto de dados será utilizado para análise do resultado e validação do modelo.

Com os dois conjuntos de dados coletados foram realizados os seus respectivos pós processamentos.

As imagens aerofotogramétricas originais de voo foram aerotrianguladas utilizando o conjunto de pontos de apoio fotogramétrico rastreados com GNSS (apoio suplementar), os quais colaboram com a orientação geométrica dos pares fotogramétricos bem como contribuem para o alcance da qualidade da aerotriangulação após o ajustamento.

Findada a etapa de orientação das imagens aéreas originais de voo foi gerado o MDE (Modelo Digital de Elevação), realizadas as ortorretificações das imagens e elaboração do ortomosaico para a área do reservatório. Estes produtos foram utilizados para avaliação da ocorrência do efeito *sun-glint* na área do corpo d'água do reservatório bem como a sua influência na geração do modelo batimétrico.

Identificadas as ocorrências de *sun-glint* nas imagens, elas passaram por um processo de remoção/atenuação deste efeito e posterior geração de novas ortofotos e MDE, utilizando a orientação original do projeto. Cabe dizer aqui que a remoção do efeito *sun-glint* em imagens aéreas e posterior geração do MDE batimétrico representa a principal inovação trazida nesta pesquisa, que será detalhada mais adiante.

Ao MDE batimétrico, no formato de nuvem de pontos e derivado das imagens aéreas corrigidas, foi aplicada a técnica de batimetria *multi-media* com o intuito de corrigir os deslocamentos aparentes (efeitos da refração da luz) presentes nas coordenadas tridimensionais, após um feixe de luz atravessar ambientes com índices de refração diferentes. Ao final deste processo foi obtido um MDE batimétrico interpolado para a área do reservatório em uma malha regular.

Os dados coletados pelo *single-beam* passaram por processamentos que possibilitaram realizar o georreferenciamento direto e obter um conjunto de pontos amostrais georreferenciados contendo medidas de profundidade do reservatório.

A última etapa desta pesquisa consistiu na avaliação da qualidade geométrica e validação do modelo batimétrico do reservatório derivado da batimetria *multi-media*, utilizando o conjunto de pontos coletados na batimetria convencional pelo *single-beam*.

4.3. RECOBRIMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

A tomada das fotografias aéreas para a área do reservatório de Cachoeira foi realizada utilizando a câmera *Digital Mapping Camera* (DMC) da Z/I *Intergraph*, que é composta por oito câmeras sendo quatro pancromáticas, uma *red*, uma *blue*, uma *green* e uma *Near Infrared*, as quais são integradas entre si possibilitando a geração de imagens multiespectrais (RGBNir) com alta resolução espacial. O certificado de calibração para a câmera DMC utilizada na tomada das fotografias encontra-se disponível no Anexo A desta tese.

Antes de realizar o recobrimento aéreo foi elaborado o plano de voo para o reservatório de Cachoeira, abrangendo uma área de aproximadamente 54,56 km². O plano de voo apresentou uma configuração final de nove faixas de voo orientadas na direção Nordeste – Sudoeste (NE-SO), as quais apresentam uma sobreposição lateral da ordem de 30%. A configuração adotada para sobreposição entre as fotografias (sobreposição longitudinal) foi de 60%, o que garante que um objeto esteja presente em até três fotografias ao longo de uma faixa de voo. O GSD³ máximo configurado para aquisição das imagens foi de 0,10 m. O plano de voo fotogramétrico para recobrimento da área do reservatório encontra-se no Apêndice A desta tese.

O recobrimento aéreo foi realizado no dia 22 de outubro de 2018, iniciado às 13:40 hs e sendo concluído às 14:40 hs, ou seja, com uma hora de operação. Durante a missão encontrava-se instalado nas proximidades da área do reservatório, mais precisamente em frente ao hangar da empresa Fototerra localizado na cidade de Bragança Paulista, um receptor GNSS de dupla frequência (Figura 23) que foi utilizado para rastreamento simultâneo com o receptor GNSS localizado na aeronave, caracterizando assim o voo apoiado.

A finalidade desta base GNSS instalada em solo é possibilitar o processamento da trajetória de voo (GNSS e inercial da aeronave), obtendo com precisão as coordenadas dos centros perspectivos de cada fotografia e suas respectivas orientações (ω, φ, κ).

³ GSD compreende na projeção do tamanho do *pixel* da imagem sobre o plano do terreno (MIKHAIL et al., 2001)

As coordenadas da base GNSS em solo foram estimadas por meio do processamento relativo, sendo utilizada como referência a estação pertencente a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) localizada na cidade de Bragança Paulista (SPBP). A Tabela 2 apresenta as coordenadas geodésicas da estação da RBMC SPBP, bem como as coordenadas ajustadas para a base GNSS de apoio ao voo, ambas no *Datum* planimétrico SIRGAS2000.

Figura 23 - Receptor GNSS instalado nas proximidades do hangar da empresa Fototerra em Bragança Paulista como base de apoio ao voo fotogramétrico



Fonte: O Autor.

Tabela 2 - Coordenadas geodésicas para a estação da RBMC SPBP e para a base do voo fotogramétrico

Estação GNSS	Latitude	Longitude	Altura Elipsoidal (m)
Estação SPBP	22° 55' 32,11795" S	46° 32' 04,09220" W	893,701
Base GNSS para o voo	22° 58' 54,45171" S	46° 32' 09,05768" W	886,803

Fonte: O Autor.

Finalizado o recobrimento aerofotogramétrico, os dados do imageamento foram processados em *softwares* específicos gerando imagens RGBNir com resoluções radiométricas de 8 *bits* e GSD máximo de 0,10 m. Foram tomadas um total de 217 imagens as quais se foram numeradas de acordo com sua posição na faixa de voo, sendo esta nomenclatura apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Nomenclatura das imagens relativas às faixas de voo

Faixa	Primeira Imagem	Última Imagem	Total de imagens
Faixa 001 A	001_0001	001_0021	21
Faixa 001 B	001_0025	001_0036	12
Faixa 002	002_0001	002_0036	36
Faixa 003	003_0001	003_0042	42
Faixa 004	004_0001	004_0043	43
Faixa 005 A	005_0001	005_0026	26
Faixa 005 B	005_0030	005_0046	17
Faixa 006 A	006_0001	006_0009	9
Faixa 006 B	006_0028	006_0038	11

Fonte: O Autor.

Em uma análise visual realizada nas imagens processadas foram evidenciadas a ocorrência de sombras de nuvens e efeito *sun-glint* (reflexo do sol na água) nas imagens do reservatório.

As informações coletadas pelo receptor GNSS da aeronave e registradas pelo sistema inercial foram combinadas juntamente com o arquivo de rastreamento da base GNSS em solo no *software* POSPac MMS 8.3, obtendo como resultado a trajetória de voo processada trazendo as informações de posicionamento e orientação para cada imagem, que são fundamentais para a orientação exterior do projeto fotogramétrico. A Figura 24 apresenta parte do arquivo da trajetória de voo após o processamento no *software* POSPac MMS 8.3.

Figura 24 - Parte do arquivo da trajetória de voo contendo as coordenadas dos centros perspectivos de cada imagem bem como suas respectivas orientações

```
*****
POS Exterior Orientation Computation Utility      Version  6.0
Copyright (C) 1997-2012 by Applanix Corporation  [Apr 19 2012]
All rights reserved.
*****

Parameter setup:
POSPROC SBET file: G:\00.DOUTORADO\00.VOO_FOTOGRAFOMETRICO\DADOS_BRUTOS\PROCESSAMENTO_IMU\VOO_FOTO\Mission 1\Proc\sbet_Mission 1.out
Camera mid-exposure event file: G:\00.DOUTORADO\00.VOO_FOTOGRAFOMETRICO\DADOS_BRUTOS\PROCESSAMENTO_IMU\VOO_FOTO\Mission 1\Extract\event1_Mission 1.dat
Event time shift: 0.000000 sec
Photo ID file:
  Photo ID file format: 2 Fields (Time, Photo ID) Format
  Offset between PHOTO ID and EVENT file times: 0.000000 sec
  PHOTO ID time tolerance: 0.300000 sec
  WGS84 Height Output Selected
  Scale the Height Output selected. Average ground height 1666.660000
Mapping frame datum: WGS84 ; Mapping frame projection : TM;
central meridian = -45.000000 deg;
latitude of the grid origin = 0.000000 deg; grid scale factor = 0.999600;
false easting = 500000.000000 m; false northing = 10000000.000000 m;
Sequence of the rotation from mapping to image frame:
  First rotation is about the 'x' axis by the 'omega' angle.
  Second rotation is about the 'y' axis by the 'phi' angle.
  Third rotation is about the 'z' axis by the 'kappa' angle.
Kappa cardinal rotation: 180.0000 deg.
Boresight values: tx = 0.0000 arc min, ty = 0.0000 arc min, tz = 0.0000 arc min.
Lever arm values: lx = 0.0000 m, ly = 0.0000 m, lz = 0.0000 m.
Shift values: X = 0.000000 meter, Y = 0.000000 meter, Z = 0.000000 meter

POS/AV Computed Data at Camera Perspective Centre
Grid: Universal Transverse Mercator ;Zone: UTM South 23 (48W to 42W) ;Datum: WGS84 ;Local Transformation: NONE ;

Record Format:
ID, # EVENT, TIME (s), EASTING, NORTHING, ELLIPSOID HEIGHT, OMEGA, PHI, KAPPA, LAT, LONG
(position in Meters, orientation in Degrees, lat, long in Deg)

1 137364.755098 369471.009 7456073.456 1814.995 1.33903 1.43409 -137.99987 -22.99855380 -46.27359618
2 137367.999349 369315.036 7455913.491 1814.542 -1.19956 -0.66599 -137.01732 -22.99998623 -46.27513133
3 137371.215594 369153.614 7455761.993 1813.123 -2.18136 -1.73981 -136.45027 -23.00134175 -46.27671893
4 137374.407852 368987.224 7455615.564 1806.359 -1.19455 -2.35588 -136.45119 -23.00265108 -46.27835461
5 137377.428075 368824.092 7455476.756 1795.557 -0.32017 -2.70968 -136.51115 -23.00389183 -46.27995788
6 137380.384297 368659.677 7455339.457 1787.744 -0.09826 -2.61868 -136.59693 -23.00511883 -46.28157357
7 137383.276520 368495.236 7455203.467 1786.386 0.30068 -2.08449 -136.98019 -23.00633398 -46.28318944
8 137386.152740 368329.968 7455068.036 1786.718 -0.35049 -1.17034 -137.48577 -23.00754400 -46.28481335
9 137389.068963 368162.552 7454933.319 1790.209 -0.58060 0.16622 -138.05863 -23.00874739 -46.28645818
10 137392.017186 367996.707 7454796.823 1792.206 0.35924 1.40814 -138.41675 -23.00996695 -46.28808787
11 137394.989420 367833.161 7454656.679 1793.059 0.24126 1.68720 -138.42921 -23.01121962 -46.28969547
12 137397.973651 367671.402 7454516.103 1796.116 0.21807 2.40246 -138.30194 -23.01247632 -46.29128571
13 137401.017875 367511.220 7454370.775 1801.052 0.13177 2.22448 -137.95330 -23.01377603 -46.29286100
14 137404.062111 367353.492 7454223.975 1804.637 1.01379 2.24166 -137.79906 -23.01508922 -46.29441250
15 137407.106347 367198.744 7454072.811 1804.397 0.64549 1.56206 -137.58239 -23.01644205 -46.29593533
16 137409.842549 367060.851 7453935.929 1804.300 0.22766 0.81287 -137.48685 -23.01766723 -46.29729252
```

Fonte: O Autor.

4.3.1. Pontos de apoio suplementar

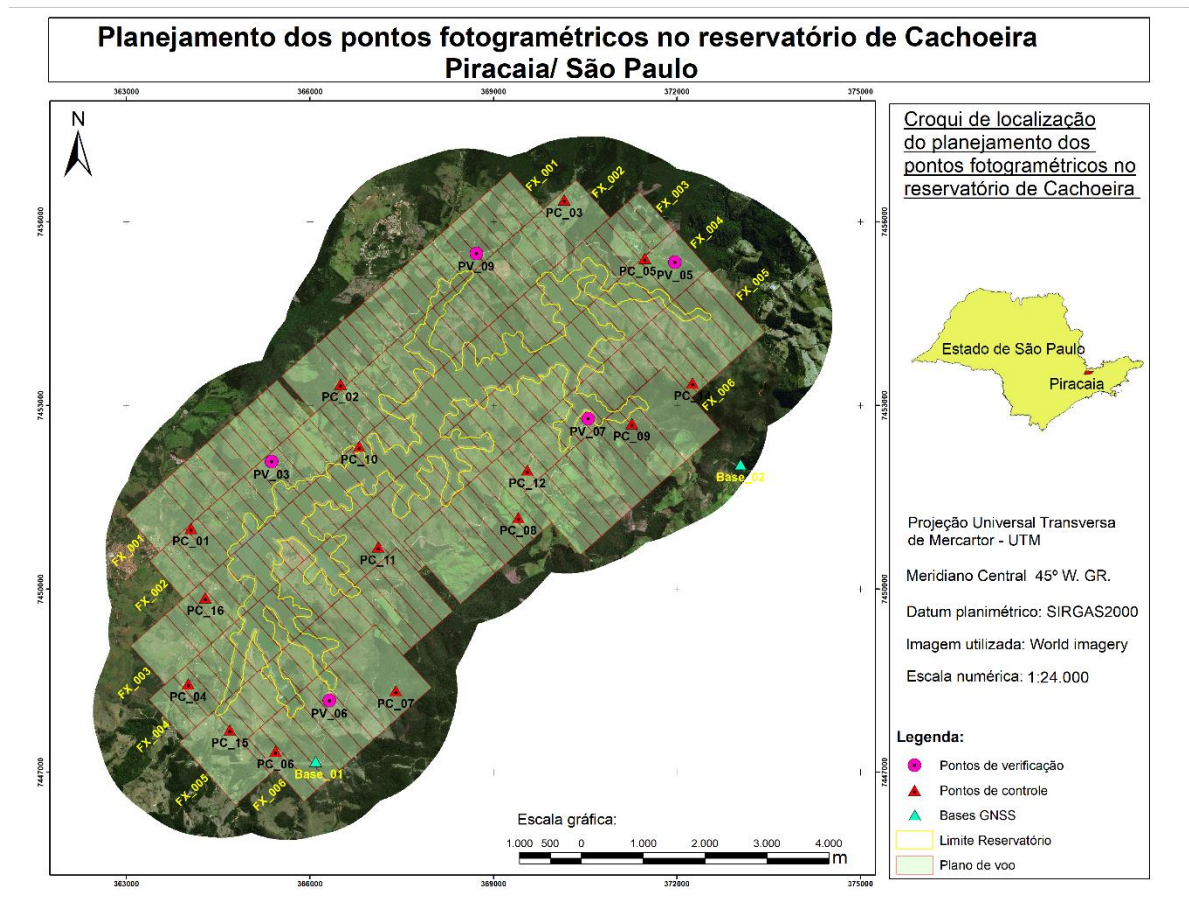
O planejamento dos pontos de apoio suplementar, HV (apoio fotogramétrico – controle Horizontal e Vertical) e CK (checagem da qualidade geométrica da aerotriangulação após o ajustamento), foram planejados de acordo com o plano de voo gráfico, conforme apresentado na Figura 25.

Foram planejados e coletados um total de 20 pontos dos quais 15 foram considerados pontos de controle horizontal e vertical (HV) e 05 como pontos de verificação (CK) a serem utilizados para análise do resultado após o ajustamento da aerotriangulação.

Os pontos de controle foram rastreados em campo nos dias 21 de outubro e 02 de novembro de 2018. Foram utilizados receptores GNSS dupla frequência (L1/L2) configurados com taxa de coleta de 1 segundo e máscara de elevação de 15°.

O método escolhido para rastreamento dos pontos foi o estático rápido com tempo de ocupação variando entre 25 e 30 minutos. O estabelecimento do tempo de ocupação dos pontos teve como embasamento a localização das bases GNSS escolhidas para o processamento. Uma vez que não foram encontradas linhas de base superiores a 10 km, seguiram-se as orientações apresentadas pelo INCRA (2013), que estabelecem que para linhas de bases de até 10 km, utilizando um receptor GNSS de simples ou dupla frequência, a solução será fixa usando efemérides transmitidas ou precisas considerando um tempo mínimo de rastreamento de 20 minutos.

Figura 25 - Planejamento dos pontos de controle fotogramétrico e de verificação



Fonte: O Autor.

Para cada um dos dias do trabalho de campo para rastreamento dos pontos de apoio suplementar, foram ocupadas duas bases GNSS, que permaneceram em operação durante todo o levantamento dos pontos de controle e verificação. As coordenadas geodésicas destas bases foram processadas em relação à estação pertencente à RBMC localizada na cidade de Bragança Paulista (SPBP). A Tabela 4 traz as

coordenadas geodésicas da estação SPBP bem como das estações bases ocupadas em campo, todas elas referenciadas ao *Datum* planimétrico SIRGAS2000.

Tabela 4 - Coordenadas geodésicas para a estação pertencente a RBMC SPBP e para as bases de campo utilizadas no rastreio para os HV e CK

Estação GNSS	Latitude	Longitude	Altura Elipsoidal (m)
Estação SPBP	22° 55' 32,11795" S	46° 32' 04,09220" W	893,701
Base_01 ⁴ _(EG_8118607)	23° 04' 42,90272" S	46° 18' 26,21573" W	829,653
Base_02 ⁵ _(EG_8118608)	23° 02' 07,06179" S	46° 14' 20,55482" W	842,961

Fonte: O Autor.

Os pontos de controle e verificação foram processados utilizando o *software* Topcon Tools 7.5.1 obtendo, para cada ponto, as coordenadas geodésicas ajustadas. Do conjunto de pontos rastreados em campo apenas o ponto apoio suplementar PC_11 apresentou problemas no ajustamento, trazendo solução do tipo *float*, não sendo utilizado nos trabalhos seguintes. A Apêndice B traz as monografias elaboradas para os pontos de controle e verificação utilizados nesta tese.

4.3.2. Orientação das imagens e geração dos produtos aerofotogramétricos

A etapa de orientação das imagens é uma das fases mais importantes do projeto aerofotogramétrico sendo definidos os parâmetros referentes a câmera utilizada, por meio da orientação interior, e os da plataforma através da orientação exterior.

Na orientação interior são definidas as características internas do sensor com o intuito de reconstruir os feixes dos raios de luz no interior do sensor durante o imageamento. A orientação interior requer o conhecimento *a priori* dos seguintes parâmetros: distância focal, posição do ponto principal (pp), coeficientes de distorção das lentes e em alguns casos os parâmetros de afinidade (MIKHAIL; BETHEL; MCGLONE, 2001). É importante dizer que todos os parâmetros envolvidos na orientação interior são determinados durante o processo de calibração do sensor e são encontrados nos certificados de calibração.

⁴ A Base_01 foi utilizada no trabalho de campo realizado em 21 de outubro de 2018.

⁵ A Base_02 foi utilizada no trabalho de campo realizado em 02 de novembro de 2018.

Nesta pesquisa as orientações das imagens adquiridas para a área do reservatório e geração dos produtos fotogramétricos foram realizadas utilizando o *software Applications Master 8.0.9*.

A primeira etapa realizada no *Applications Master* consiste na configuração do projeto e importação do conjunto das imagens aéreas, coordenadas aproximadas para os CP's bem como os ângulos de orientação de cada imagem e as coordenadas dos pontos de apoio suplementar rastreados em campo. O projeto aerofotogramétrico foi configurado para ser realizado no *Datum* planimétrico SIRGAS2000 e considerando a altura elipsoidal.

Ao importar as imagens para o projeto elas já se encontravam posicionadas e orientadas pois as coordenadas de seus centros perspectivos (X_0, Y_0, Z_0) e orientações (ω, φ, κ) foram determinadas *a priori* com a integração e processamento das informações rastreadas pelo receptor GNSS e inercial da aeronave durante a missão.

Antes de realizar a aerotriangulação, todos os pontos de apoio suplementar (HV e CK), por mais que ao serem importados no projeto estivessem bem próximos dos objetos representados nas imagens, tiveram suas posições avaliadas em cada imagem e foram reposicionados manualmente por meio de uma releitura deles nas imagens.

A Figura 26 ilustra a avaliação para a posição do ponto de apoio suplementar PC_08 nas imagens 005_0019, 005_0020 e 005_0021. Os triângulos em vermelho nas imagens indicam a localização do ponto após a importação do arquivo de coordenadas do apoio suplementar enquanto o triângulo em amarelo indica a leitura do ponto realizada em cada imagem exatamente na posição em que ele foi rastreado em campo.

Figura 26 - Exemplo de avaliação e releitura dos pontos de apoio suplementar nas imagens



Fonte: O Autor.

Antes de executar a geração dos pontos de passagem (pontos de ligação entre as imagens gerados automaticamente por meio da correlação de *pixels*) e a fototriangulação, foi definida a melhor configuração para a execução destas tarefas. Referente a estratégia de ajustamento como parâmetro, foi selecionada apenas a utilização do GNSS. Para geração dos pontos de passagem foi escolhida a opção que traz uma densidade esparsa seguindo um padrão de posição 4x4, ou seja, o modelo fotogramétrico será dividido em 16 subregiões (regiões de Grüber) nas quais serão localizados/definidos *tie-points*.

O desvio padrão estabelecido para os pontos na imagem foi metade do tamanho do pixel ($12 \mu m$), ou seja, $6 \mu m$. Os desvios padrões definidos para os pontos no espaço imagem, considerando leituras manuais e automáticas, foram 0,0040 mm e 0,0024 mm, respectivamente.

Para o espaço objeto, os desvios padrões para as coordenadas planimétricas foi de 0,0299 m enquanto para a altimétrica o valor considerado foi de 0,0972 m. Cabe ressaltar que estes valores foram adotados conforme especificado no manual do *software* utilizado e eles traduzem o critério de aceitação da aerotriangulação após o ajustamento.

Por fim, a última configuração antes da execução das tarefas foi o estabelecimento dos desvios padrões para as posições dos CP's, oriundos do receptor GNSS da aeronave, e os ângulos de orientações registrados pelo sistema inercial. Para as posições (E, N e h) foi estabelecido o valor de 0,15 m e para os ângulos de rotação 0,010° que correspondem aos pesos da matriz das observações no ajustamento.

É importante dizer que os desvios padrões para os pontos de controle, os centros perspectivos e os ângulos de rotação foram definidos com base dos desvios padrões obtidos após seu processamento e estimativa de seus valores, o que é comumente utilizado na prática

Após a geração dos pontos de passagem eles tiveram os valores de seus resíduos (RMS) avaliados, sendo alguns deles removidos por estarem localizados em regiões diferentes nas imagens.

Os pontos de passagem gerados na porção central do reservatório (na parte mais profunda do reservatório onde existe uma homogeneidade nas imagens ou em regiões contaminadas com *sun-glint*) foram removidos devido a não apresentarem uma boa correlação nas imagens (alto valor de rms), ou seja, nesta região não existe uma superfície texturizada, não havendo uma correlação confiável.

Em algumas regiões das bordas do reservatório que apresentavam poucos pontos e que eram passíveis de se encontrar regiões mais bem definidos nas imagens, foram inseridos alguns pontos de passagem manualmente, de modo a melhorar a ligação entre elas.

Finalizada a etapa de edição dos pontos de passagem realizou-se o ajustamento do bloco, obtendo o valor 1,6 microns (0,1 pixel) para o *sigma a priori*, indicando que não existe nenhum erro sistemático identificado no ajustamento, a um nível de significância de 95% no teste chi-quadrado.

Como valor de referência para este parâmetro, a literatura (manual do *software* utilizado) diz que para valores superiores a 0,5 pixels provavelmente existem erros sistemáticos no projeto, que no caso podem indicar a necessidade de calibração dos parâmetros de distorção radial e descentrada para a câmera utilizada.

O resultado da aerotriangulação foi verificado e avaliado por meio dos resíduos encontrados nas coordenadas (X, Y, Z) para os pontos de apoio suplementar, apresentados no relatório de processamento da aerotriangulação. As Figuras 27 e 28

trazem os resíduos obtidos após o ajustamento para os pontos de controle (HV) e verificação (CK) utilizados.

Figura 27 - Resíduos finais para os pontos de apoio suplementar do tipo HV utilizados na aerotriangulação

Ground control points

Ground control point errors

#	ID	Fold	X [m]	Y [m]	Z [m]	Total [m]	Remark
1	PC01	4	0.0274	0.0001	0.0831	0.0875	
2	PC02	3	0.0954	-0.1252	0.0066	0.1575	
3	PC04	5	0.0298	-0.1593	0.2194	0.2727	
4	PC05	5	0.0393	0.0350	0.2413	0.2470	
5	PC06	4	0.0233	-0.0398	0.3093	0.3127	
6	PC07	2	0.2371	0.1329	0.0208	0.2726	
7	PC08	3	-0.0590	-0.0069	0.0246	0.0643	
8	PC09	6	-0.1140	0.0482	0.1468	0.1920	
9	PC10	5	-0.1294	0.0573	0.2186	0.2604	
10	PC12	3	0.0712	-0.0131	0.1377	0.1556	
11	PC14	2	0.0330	0.1484	-0.0574	0.1625	
12	PC15	6	-0.0671	0.0045	0.3238	0.3308	
13	PC16	4	-0.1200	0.0667	0.0638	0.1514	
14	PV09	4	0.2532	-0.1102	0.1719	0.3253	
	Maximum		0.2532	-0.1593	0.3238		
	Mean		0.0229	0.0027	0.1365		
	Sigma		0.1190	0.0902	0.1175		
	RMSE(x,y,z)		0.1169	0.0870	0.0313		
	RMSEr		0.1458	SQRT(RMSEx * RMSEx + RMSEy * RMSEy)			
	ACCr (at 95% Confidence Level)		0.2523	RMSEr * 1.7308			
	ACCz (at 95% Confidence Level)		0.0613	RMSEz * 1.9600			

Fonte: O Autor.

Figura 28 - Resíduos finais para os pontos de apoio suplementar do tipo CK utilizados na aerotriangulação

Check points

Check point errors

#	ID	Fold	X [m]	Y [m]	Z [m]	Total [m]	Remark
1	PV03	6	-0.0121	0.0227	-0.0529	0.0589	
2	PV05	4	-0.1412	-0.0211	-0.0353	0.1471	
3	PV06	5	0.0260	0.0449	-0.0559	0.0763	
	Maximum		-0.1412	0.0449	-0.1086		
	Mean		-0.0424	0.0155	-0.0480		
	Sigma		0.0876	0.0336	0.0111		
	RMSE(x,y,z)		0.0832	0.0315	0.0554		
	RMSEr		0.0890	SQRT(RMSEx * RMSEx + RMSEy * RMSEy)			
	ACCr (at 95% Confidence Level)		0.1540	RMSEr * 1.7308			
	ACCz (at 95% Confidence Level)		0.1086	RMSEz * 1.9600			

Fonte: O Autor.

A respeito dos pontos de apoio suplementar utilizados, tem-se que além dos treze pontos de apoio do tipo HV, um dos pontos de apoio do tipo CK (PV_09) foi utilizado como HV pelo fato de que a região onde ele se localiza no bloco fotogramétrico

compreende em uma das extremidades e início de faixa. Esta necessidade de alteração do tipo de ponto de apoio suplementar foi necessária para garantir uma boa geometria da distribuição dos pontos de apoio no bloco. Desta maneira a checagem da aerotriangulação foi realizada utilizando três pontos: PV_03, PV_05 e PV_06.

Como pode ser visto na Figura 27, o resíduo final para os pontos de apoio suplementar do tipo HV (RMSE) para as coordenadas X, Y e Z foram considerados satisfatórios e dentro do esperado no projeto, ou seja, inferior a 1 pixel (0,10 cm).

A análise individual dos resíduos nas componentes X, Y e Z dos pontos de apoio suplementar apresentam valores acima do estabelecido no projeto. Esta ocorrência pode ser explicada pelo fato de que o bloco fotogramétrico do projeto situa-se em uma região que contém um grande corpo d'água (reservatório) que, conforme mencionado anteriormente fica prejudicada no que diz respeito a existência de pontos de passagem nas imagens que cobrem a área do reservatório.

Como se sabe, a função dos pontos de passagem nas imagens, além de realizar a ligação entre elas é manter o bloco fotogramétrico seguro sem flutuações ao longo das coordenadas. Neste caso, devido a algumas imagens não conterem pontos de passagem a flexibilidade do bloco interferiu no resultado da aerotriangulação que foi expresso nos valores dos RMS individuais em algumas componentes.

A avaliação individual dos resíduos dos pontos de apoio suplementar do tipo CK, com exceção da coordenada X do PV-05, mostram que todos os valores obtidos individualmente para cada ponto testado encontram-se abaixo de 0,10 m nas componentes. Consequentemente os valores encontrados para o RMSE também estão dentro da precisão estabelecida, sendo o ajustamento fotogramétrico considerado aceito para o bloco no teste *t-student* e o resultado satisfatório para esta etapa.

Segundo El-Sheimy, Veleo e Habib (2005) a geração do MDE a partir de imagens fotogramétricas tem como princípio a correlação de imagens, cujo objetivo consiste em encontrar padrões correspondentes em diferentes imagens. Os métodos mais comuns encontrados na literatura têm como base a busca de áreas ou feições usando correlação de uma pequena janela (denominada *kernel* ou célula *kernel*, com matrizes de *pixels* com tamanho de 3x3, por exemplo) entre os pares estereoscópicos.

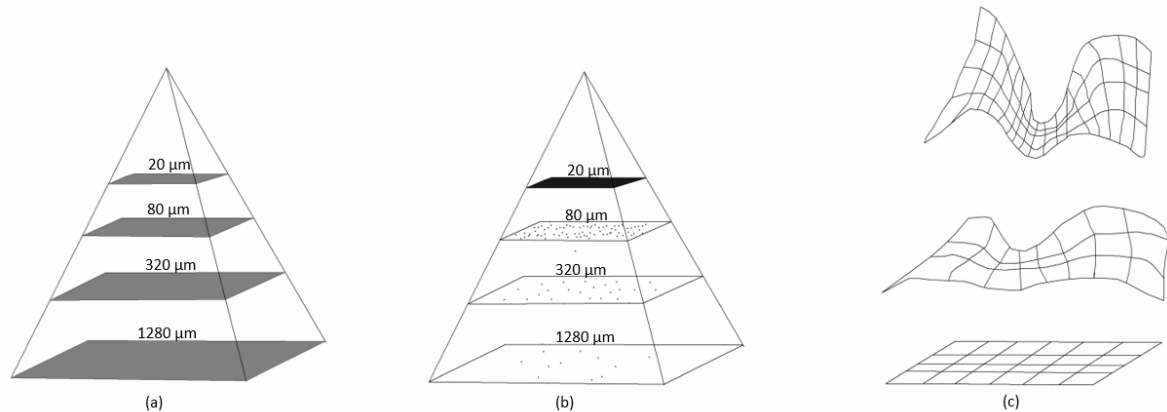
Os métodos de busca no espaço objeto têm como princípio a determinação de pontos homólogos por correspondência de pares de imagens. Uma vez encontrados os pares homólogos, são realizadas interseções fotogramétricas com o objetivo de obter posições tridimensionais no espaço objeto. Finalizada a busca dos pares homólogos nas imagens é realizada a combinação dos resultados intermediários para buscar o resultado, aplicando operações estatísticas nos valores das coordenadas dos pontos encontrados em diferentes pares.

Para diminuir as buscas durante a correlação, na maioria das vezes são utilizadas técnicas de normalização de imagens por meio das linhas epipolares combinadas com técnicas que utilizam um procedimento hierárquico através de pirâmides de imagens (IDOETA, 2007). Neste procedimento são realizadas amostragens das imagens em níveis com diferentes resoluções, por exemplo, tirando a média de um quadrado com quatro *pixels*, em toda a imagem, para formar uma imagem quatro vezes menor. O processo se repete criando imagens com menor resolução e diminuindo o tempo de busca e do processamento como um todo.

O processo de busca dos pontos homólogos começa nas imagens com menor resolução, percorrendo todos os níveis até as imagens com maior resolução. Em cada nível da pirâmide são feitas varreduras por linhas da imagem aplicando o processo de correspondência entre os pontos previamente analisados e que apresentam uma alta variância bidirecional. O adensamento dos pontos do MDE é realizado em etapa posterior utilizando a pirâmide de imagens (OLIVEIRA, 2013).

A Figura 29 ilustra o processo de geração do MDE por meio da normalização de imagens combinada com as pirâmides das imagens.

Figura 29 - Processo de geração do MDE a partir das imagens fotogramétricas. (a) pirâmide de imagens nas diferentes resoluções. (b) pontos homólogos nas imagens nos diferentes níveis da pirâmide. (c) MDE gerado a partir dos pontos homólogos encontrado



Fonte: Adaptado de Trimble, 2013

Segundo o manual do *software Applications Master* o MATCH-T DSM possibilita a realização da correlação de imagens por meio de três algoritmos que podem ser utilizados individualmente ou combinados entre si: *Feature Based Matching* (FBM), *Least Square Matching* (LSM) e *Cost Based Matching* (CBM).

O método FBM realiza a correlação de imagens de maneira mais robusta. Sua inicialização requer uma aproximação mais grosseira trazendo maior rapidez ao processo. Sua precisão é cerca de 1/3 do valor do pixel da imagem. Durante a correspondência das imagens o processo calcula os valores para uma imagem sendo possível descrever a aparência de uma determinada feição. Estes mesmos valores são encontrados também na segunda imagem.

A estratégia LSM é mais precisa que o FBM, sendo necessárias melhores aproximações iniciais. Geralmente é utilizado no refinamento do processo de geração dos pontos para se obter uma melhor precisão, que pode chegar até 1/10 do *pixel*. Este algoritmo cria um modelo de 21x21 *pixels* (célula *kernel*) a partir de uma imagem, que é sobreposta à segunda imagem até encontrar a matriz de 21x21 da segunda imagem que melhor se corresponde com a da primeira. Durante a sobreposição são realizadas diferentes comparações entre as matrizes de 21x21, procurando minimizar até que a raiz quadrada da soma dos quadrados dos resíduos atinja um valor mínimo por meio de iterações realizadas.

O MDE com alta densidade de pontos é proporcionado pelo algoritmo CBM devido a correlação de imagens ser realizado *pixel a pixel*, que difere do FBM e LSM que utilizam uma abordagem baseada em áreas. Para um determinado *pixel* em uma imagem a busca do seu correspondente na segunda imagem é realizada através de um caminho chamado *3D-cost-cube*. Cada direção no *3D-cost-cube* representa um movimento na direção x e y na imagem para encontrar seu correspondente na segunda imagem. O *pixel* correspondente será aquele que tiver o menor valor encontrado no modelo *3D-cost-cube*.

Para a geração do MDE na zona do reservatório, foram executados múltiplos testes empregando individualmente e de forma combinada, cada uma das três estratégias de correlação de imagens previamente descritas. O algoritmo FBM mostrou-se mais eficaz, proporcionando uma representação topográfica mais coerente do relevo submerso, minimizando a prevalência de ruídos indesejados. Esta constatação emergiu como uma contribuição significativa desta pesquisa no âmbito da batimetria.

A análise da nuvem de pontos fotogramétrica mostrou uma baixa densidade de pontos para a região do corpo d'água, o que já era esperado devido a utilização do algoritmo FBM na correlação de imagens e pelo fato de que existem poucas correspondências encontradas na região das imagens que contém corpos d'água devido à grande semelhança entre os *pixels* vizinhos. O espaçamento médio entre os pontos para a região do corpo d'água foi de 3,5 m, podendo ser considerado um espaçamento razoável para representação de modelos batimétricos derivados da batimetria *multi-média*. Em conclusão a esta etapa foram gerados o ortomosaico e o MDE (na forma de nuvem de pontos e modelo interpolado) para a área do reservatório utilizando as imagens originais de voo.

Em análise ao ortomosaico gerado com as imagens originais (Figura 30) notou-se a ocorrência do efeito *sun-glint* em diversas áreas do reservatório de Cachoeira. A verificação realizada sobre a nuvem de pontos derivada da correlação de imagens utilizando o algoritmo FBM apresentou incoerências na representação topográfica do modelo submerso, principalmente nas regiões que do reservatório que tiveram ocorrências do efeito *sun-glint* nas imagens.

No que se refere a problemática evidência na representação topográfica do reservatório, elas referem-se a ocorrências de falsas ilhas que foram geradas principalmente nas regiões do corpo d'água contendo a ocorrência do efeito *sun-glint*

nas imagens, nos levando a concluir que ele afeta o processo de correlação de imagens.

Como o efeito *sun-glint* gera um ruído no valor do brilho da imagem consequentemente ele também afeta o processo de correlação de *pixel* do algoritmo FBM, trazendo um “estouro” principalmente na coordenada altimétrica.

Como descrito no fluxograma da pesquisa (Figura 22) a estratégia adotada neste trabalho e que corresponde a uma inovação da pesquisa consiste na utilização de algoritmos de remoção/atenuando do efeito *sun-glint* nas imagens aéreas, corrigindo a ocorrência deste efeito e utilizando as imagens corrigidas no projeto aerofotogramétrico, gerando outros produtos: ortomosaico e a nuvem de pontos fotogramétrica (que será utilizada na batimetria *multi-media*).

4.4. CORREÇÃO/ATENUAÇÃO DO EFEITO *SUN-GLINT* NAS IMAGENS AÉREAS

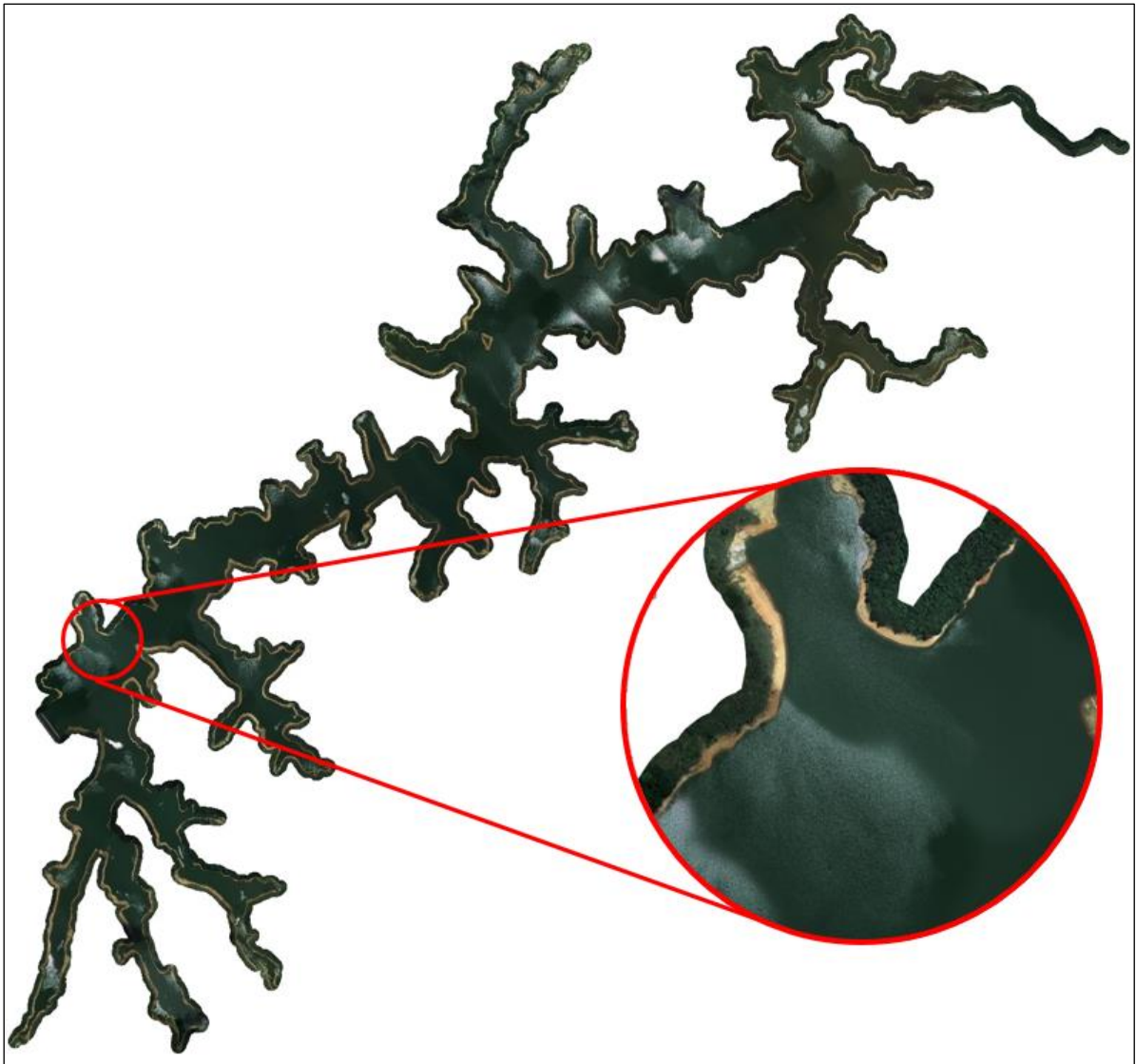
As imagens obtidas para o reservatório de Cachoeira foram adquiridas com a elevação do sol próximo de 80°, formando uma geometria compreendida entre o ângulo de incidência da luz solar, a superfície da lâmina d'água e o sensor instalado na aeronave propícia à ocorrência do efeito *sun-glint* na área do reservatório.

A Figura 30 apresenta o ortomosaico gerado para o reservatório de Cachoeira utilizando as imagens originais de voo, e, no destaque vê-se uma região em que se manifesta o efeito *sun-glint*, caracterizado por regiões esbranquiçadas.

Conforme mencionado previamente, os primeiros experimentos conduzidos para a obtenção da nuvem de pontos fotogramétrica mostraram que os *pixels* das imagens contendo o efeito *sun-glint*, trouxeram erros na altimetria dos pontos da nuvem gerada durante a correlação de imagens. Nestas regiões, a altimetria dos pontos estava acima do nível d'água gerando pseudo-ilhas no MDE.

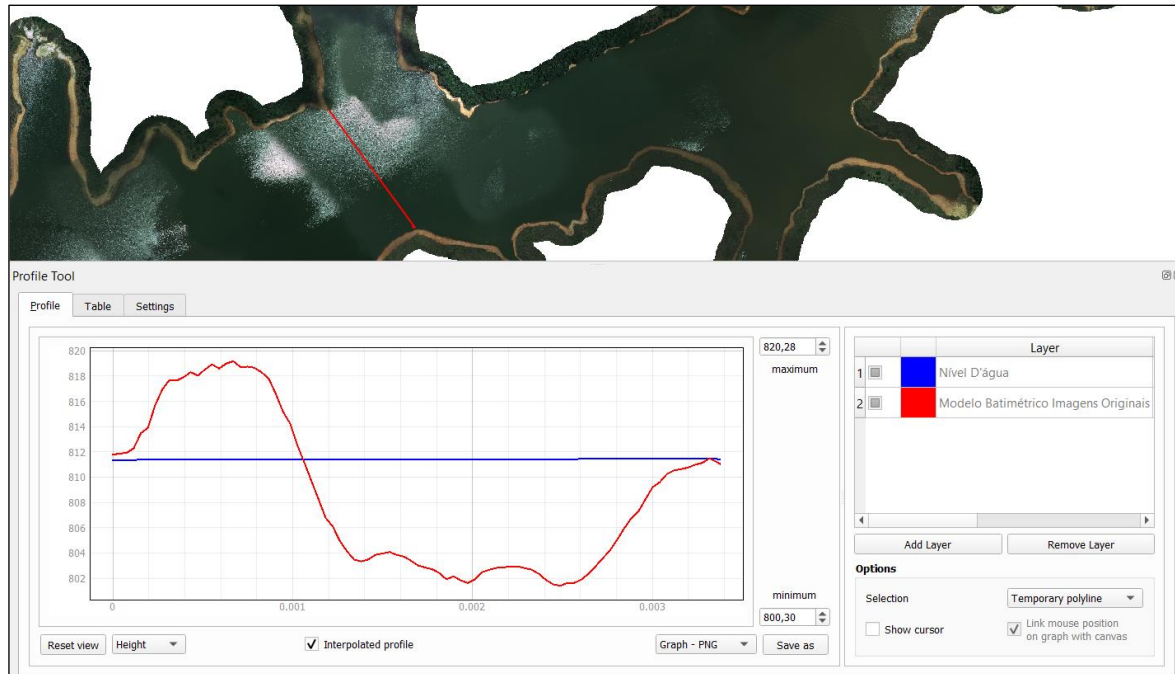
A Figura 31 mostra um perfil gerado sobre o MDE em uma região do reservatório onde existe uma região com grande contaminação de *sun-glint*. Pelo perfil representado nota-se claramente que a altimetria gerada no modelo batimétrico apresenta elevações acima do nível d'água (~811 m). Esta ocorrência foi observada em todas as regiões do corpo d'água onde houve registros deste fenômeno.

Figura 30 - Ortomosaico gerado com as imagens tomadas para o reservatório de Cachoeira, com destaque em uma região contendo o efeito *sun-glint*



Fonte: O Autor.

Figura 31 - Influência do efeito *sun-glint* na geração do MDE batimétrico, notando-se claramente esse efeito (ilhas) através do traçado de um perfil ao longo da linha vermelha indicada no ortomosaico do reservatório



Fonte: O autor.

Na tentativa de minimizar os efeitos ocasionado pelo *sun-glint* durante a correlação de imagens empregada na constituição do MDE, foi aplicado às imagens originais de voo o algoritmo proposto por Lyzenga, Malinas e Tanis (2006) e descrito em detalhes no Capítulo 3, para correção/atenuação deste efeito nas imagens aéreas. O algoritmo utilizado nesta pesquisa para correção do efeito *sun-glint* foi escrito na linguagem de programação Python e integra o Apêndice C desta tese.

A Figura 32 mostra uma parte do corpo d'água do reservatório registrada em uma imagem aérea, sendo que em (A) tem-se a imagem original contendo *pixels* contendo o efeito *sun-glint* e em (B) a mesma imagem corrigida utilizando o algoritmo detalhado no Capítulo 3.

Figura 32 - Imagens multiespectrais tomadas para o reservatório de Cachoeira onde em A tem-se a imagem original contendo o *sun-glint* e em B a imagem corrigida. Nas duas figuras as setas vermelhas indicam as regiões afetadas pelo *sun-glint* (A) e corrigida (B).



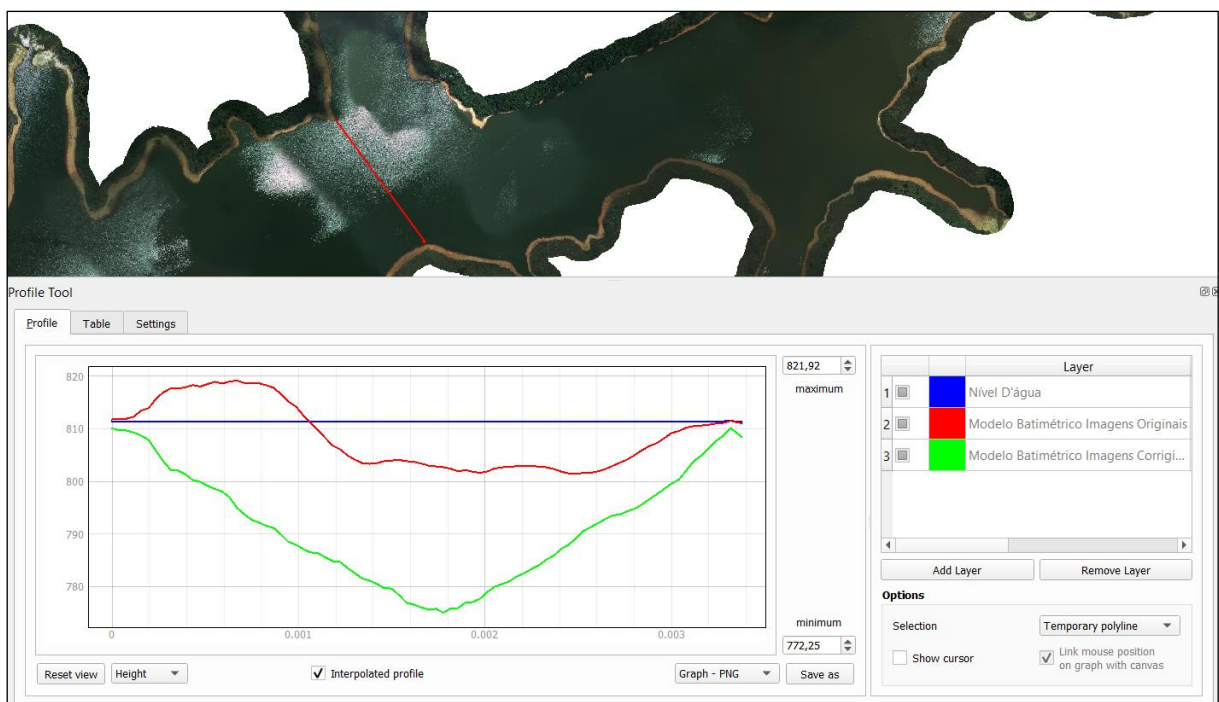
Fonte: O autor.

É importante dizer que as imagens geradas após a correção/atenuação do efeito *sun-glint*, como já era de se esperar, apresentam apenas três bandas espectrais (RGB). Esta ocorrência é devido ao fato que o algoritmo de remoção/atenuação do efeito *sun-glint* tem como base fundamental de operação a utilização da banda do infravermelho, não sendo reescrita pelo algoritmo na reconstituição da imagem corrigida.

A partir das imagens corrigidas foi realizado novamente a correlação de imagens com o intuito de obter uma nuvem de pontos com topografia mais coerente e representativa do relevo submerso ao reservatório, eliminando a ocorrência das pseudo-ilhas encontradas previamente na nuvem de pontos fotogramétrica gerada com as imagens originais de voo.

A Figura 33 mostra dois perfis longitudinais feitos na mesma região de onde foi realizado o perfil apresentado na Figura 31. A linha de cor vermelha refere-se ao traçado realizado sobre o MDE gerado com as imagens originais de voo, enquanto o perfil representado na cor verde refere-se à representação topográfica extraída do MDE derivado das imagens corrigidas.

Figura 33 - Perfis longitudinais gerados a partir dos MDE obtidos com a correlação de imagens utilizando as imagens originais (vermelho) e imagens corrigidas (verde). O nível d'água para o dia da tomada das imagens é representado na cor azul



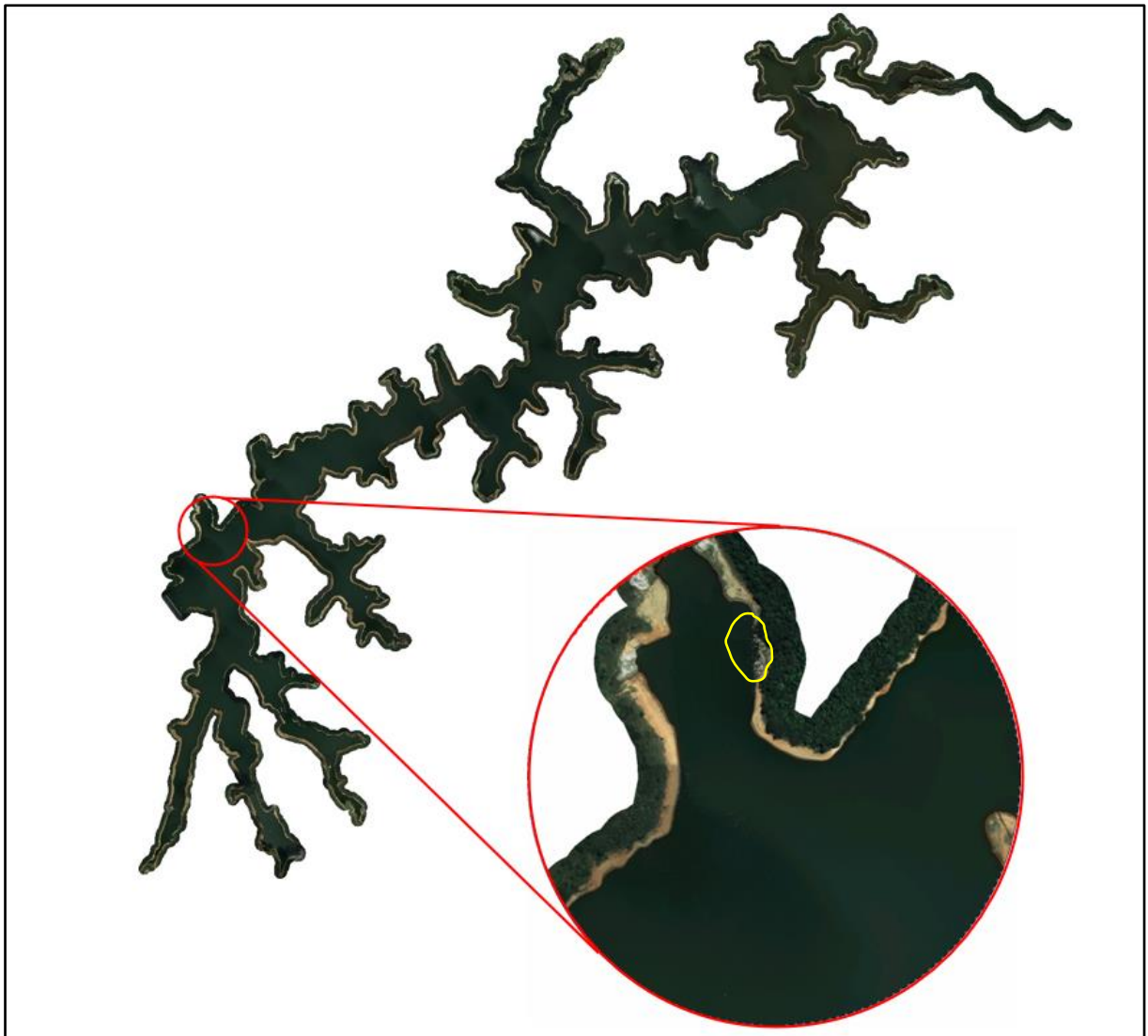
Fonte: O Autor.

O algoritmo de remoção/atenuação do efeito *sun-glint* nas imagens trouxe uma melhora significativa na representação da topografia submersa do reservatório de Cachoeira, como se pode ver pelo gráfico da Figura 33. A linha vermelha não é representativa da topografia submersa pois traz uma pseudo-ilha na parte esquerda (perfil acima da linha d'água) e, pelo efeito das médias, um fundo bem mais raso.

Como se pode ver no perfil ilustrado na cor verde, tem-se uma coerência da representatividade da topografia submersa trazendo uma melhor correspondência do que se espera obter em um perfil batimétrico derivado de técnicas convencionais. Esse resultado mostra que um dos objetivos específicos foi obtido.

A nuvem de pontos fotogramétrica obtida pela correlação de imagens aplicada às imagens áreas corrigidas será utilizado na aplicação da técnica de batimetria *multi-media*. Ainda nesta etapa também foi realizada a ortorretificação das imagens corrigidas obtendo o ortomosaico contendo apenas as bandas RGB (Figura 34).

Figura 34 - Ortomosaico gerado com as imagens RGB com o *sun-glint* corrigido/minimizado



Fonte: O Autor.

Ao analisar o ortomosaico produzido a partir das imagens corrigidas (Figura 34), ainda se observam resquícios da ocorrência do *sun-glint* (destacado em amarelo). Estas áreas foram avaliadas, revelando pixels fortemente impactados por esse efeito, ou seja, seu valor de brilho encontra-se totalmente saturado na cor branca.

Previamente podemos concluir que o algoritmo funciona bem na remoção/atenuação do *sun-glint* em imagens onde o efeito não é excessivamente intenso. É importante

destacar também que a mitigação desse efeito nas imagens contribuiu significativamente para a melhoria da correlação entre os *pixels* durante a correlação de imagens, resultando em um modelo topográfico com uma representação mais coerente do modelo batimétrico.

4.5. CORREÇÃO DOS EFEITOS DE REFRAÇÃO DA LUZ

Esta pesquisa de Doutorado foi marcada positivamente pelo intercâmbio realizado junto ao Instituto de Fotogrametria e Geoinformática da Universidade de Stuttgart – Alemanha (<https://www.ifp.uni-stuttgart.de/>) e fomentado pela CAPES no programa PDSE (Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior), com anuência e apoio do orientador e Programa de Pós-graduação da Escola Politécnica.

O convite realizado pelo instituto ocorreu durante a fase inicial desta tese e foi proposto por meio do diretor do Instituto Prof. Doutor Uwe Söergel, para ter como co-orientador o Prof. Doutor Gottfried Mandlburger, especialista na área LiDAR batimétrico, batimetria multiespectral e *multi-media*, bem como outras linhas de pesquisa. O período de intercâmbio, que ocorreu no período compreendido entre 11/2018 e 11/2019, que foi um tempo de grande aprendizado.

Foi sugerido pelo co-orientador Prof. Gottfried Mandlburger a correção dos efeitos da refração da luz na nuvem de pontos do reservatório utilizando o *software* OPALS (*Orientation and Processing of Ariborne Laser Scanning data* - <https://opals.geo.tuwien.ac.at/html/stable/index.html>), desenvolvido pelo grupo de pesquisa em fotogrametria e sensoriamento remoto da Universidade de Viena - Áustria.

O OPALS é um *software* gratuito de cunho acadêmico que requer uma licença de uso fornecida pelo grupo de pesquisa. Ele é composto por um conjunto de módulos que fornecem poderosas ferramentas de processamento de dados provenientes de varredura LiDAR aerotransportado (topográfico e batimétrico) bem como outros campos de aplicação como floresta, hidrografia, modelagem de cidades e linhas de transmissão de energia.

Dentre os módulos estudados e utilizados durante a pesquisa, merece destaque o *Snellius*. Como o próprio nome sugere, esta ferramenta realiza correções do efeito da

refração da luz tendo como base principal a Lei de *Snell* e toda formulação matemática descrita nesta tese.

A utilização do módulo *Snellius* para realizar a correção dos efeitos na refração da luz na nuvem de pontos batimétrica é bastante simples. Como dados de entrada são necessários a nuvem de pontos fotogramétrica (para a região do corpo d'água), o arquivo de orientação das imagens após a aerotriangulação e o arquivo de referência da lâmina d'água para o instante em que as imagens foram adquiridas.

As Figuras 35 e 36 mostram respectivamente parte da nuvem de pontos fotogramétrica do reservatório bem como o arquivo de referência da lâmina d'água interpolado utilizado neste procedimento.

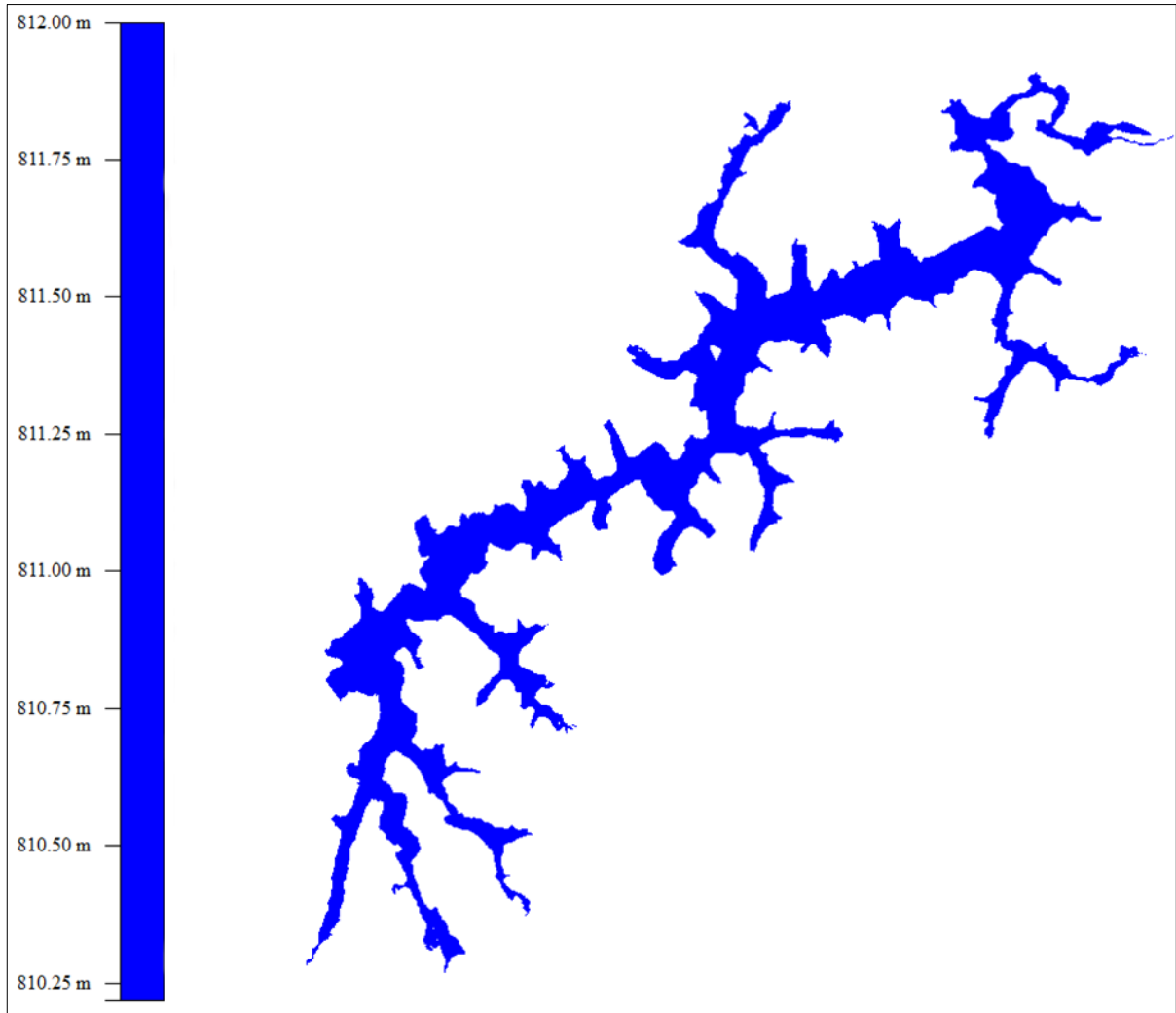
Figura 35 - Nuvem de pontos fotogramétrica utilizada no módulo *Snellius* para correção da refração da luz para os pontos representativos do corpo d'água



Fonte: O Autor.

Na Figura 35 o polígono representado na cor vermelha refere-se à delimitação da área do corpo reservatório com um *buffer* de 50 m estendendo para a parte seca. Os pontos mais esparsos (parte mais clara) referem-se aos pontos gerados por correlação de imagem na região do corpo d'água. A estes pontos foi aplicada a correção da refração da luz, obtendo a nuvem de pontos batimétrica com efeitos da refração da luz corrigidos.

Figura 36 - Lâmina d'água do reservatório de Cachoeira a ser utilizado como dado de insumo no *Snellius*



Fonte: O Autor.

O arquivo de referência da lâmina d'água traduzido em imagem na Figura 36 foi gerado através da nuvem de pontos fotogramétrica, após obter uma imagem contendo os índices calculados pelo NDWI (*Normalized Difference Water Index* – Índice de Diferença Normalizada da Água). Por meio deste índice foi possível separar com exatidão a parte de água do reservatório e assim, eliminar os pontos da nuvem que foram gerados sobre o corpo d'água. Com os pontos restantes, foi realizada a interpolação do modelo, obtendo o arquivo interpolado *raster* e apresentado na Figura 36. É notável que a variação altimétrica da lâmina d'água é de 2,25 m, fato este verificado pela escala altimétrica (legenda) da figura onde mostra que a menor elevação é de 810,25 m e a máxima de 812,00 m.

Um exemplo do arquivo de orientação de um modelo fotogramétrico utilizado no módulo *Snellius* é apresentado na Figura 37. Este arquivo foi obtido diretamente pelo *software Applications Master* após finalizada a aerotriangulação.

O arquivo de orientação é bastante simples e gerado por pares de imagens. Como se pode ver no exemplo da Figura 37, o arquivo é composto de três linhas: a primeira apresenta a indicação do que cada coluna do arquivo representa, a segunda e terceira linhas trazem o identificador das imagens bem como parâmetros de orientação exterior para cada uma das imagens ao que o arquivo faz referência.

Figura 37 - Exemplo de um arquivo de orientação exterior (para um par de imagens) utilizado no módulo *Snellius*

```
#ImgId X Y Z Omega Phi Kappa
0010002 369315.366 7455913.375 1814.531 -1.26442 -0.57966 -137.69734
0010003 369153.925 7455761.892 1813.125 -2.24542 -1.65120 -137.13066
```

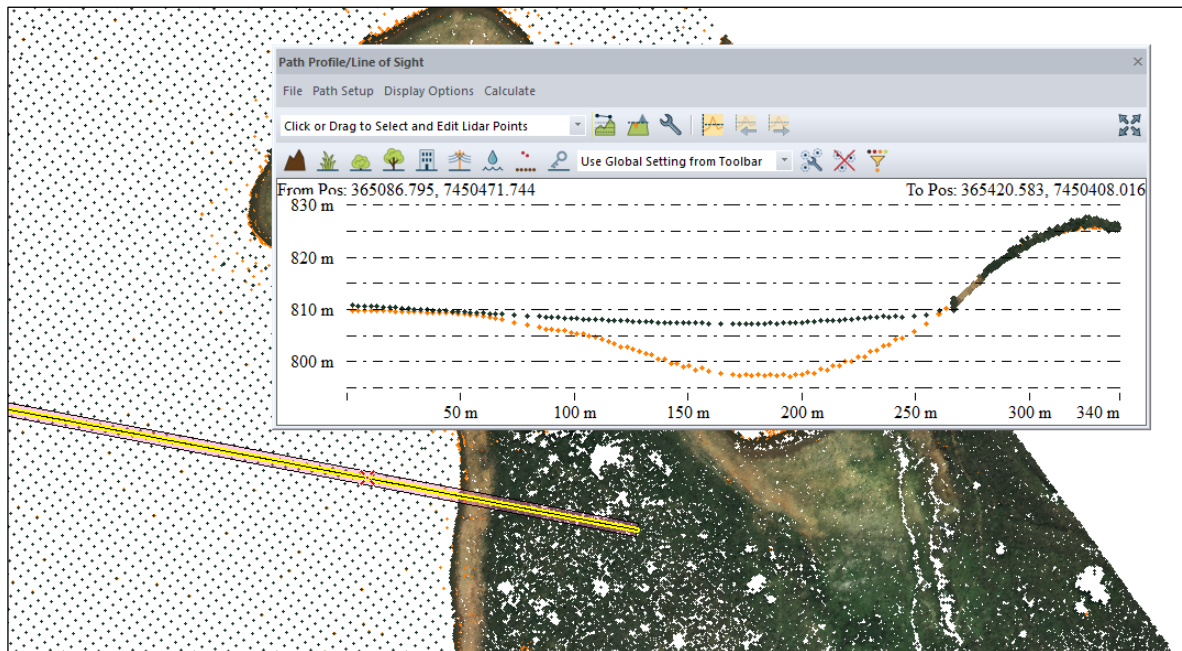
Fonte: O Autor.

É importante dizer que a utilização da nuvem de pontos fotogramétrica no módulo *Snellius* precisa ser exportada após a correlação de imagens por pares e não em um arquivo único para a área completa do reservatório. Para cada arquivo de nuvem de pontos fotogramétrica a ser corrigida deverá existir o seu respectivo arquivo de orientação dos pares de imagens.

A Figura 38 apresenta dois perfis longitudinal gerado para uma mesma região das nuvens de pontos fotogramétricas do reservatório para um mesmo par de imagens. Os pontos representados na cor verde escuro traduzem os pontos da nuvem fotogramétrica antes da correção da refração da luz e os pontos representados na cor laranja traduzem parte da nuvem de pontos corrigida pelo módulo *Snellius*.

Pela Figura 38 é possível observar que a correção da refração da luz ocorre nas três componentes (X, Y e Z), mas as maiores correções são evidenciadas na componente altimétrica (Z).

Figura 38 - Perfis longitudinal (linha amarela) gerados considerando a nuvem de pontos fotogramétrica original (verde escuro) e os pontos fotogramétricos corrigidos pelos *Snellius* (laranja)



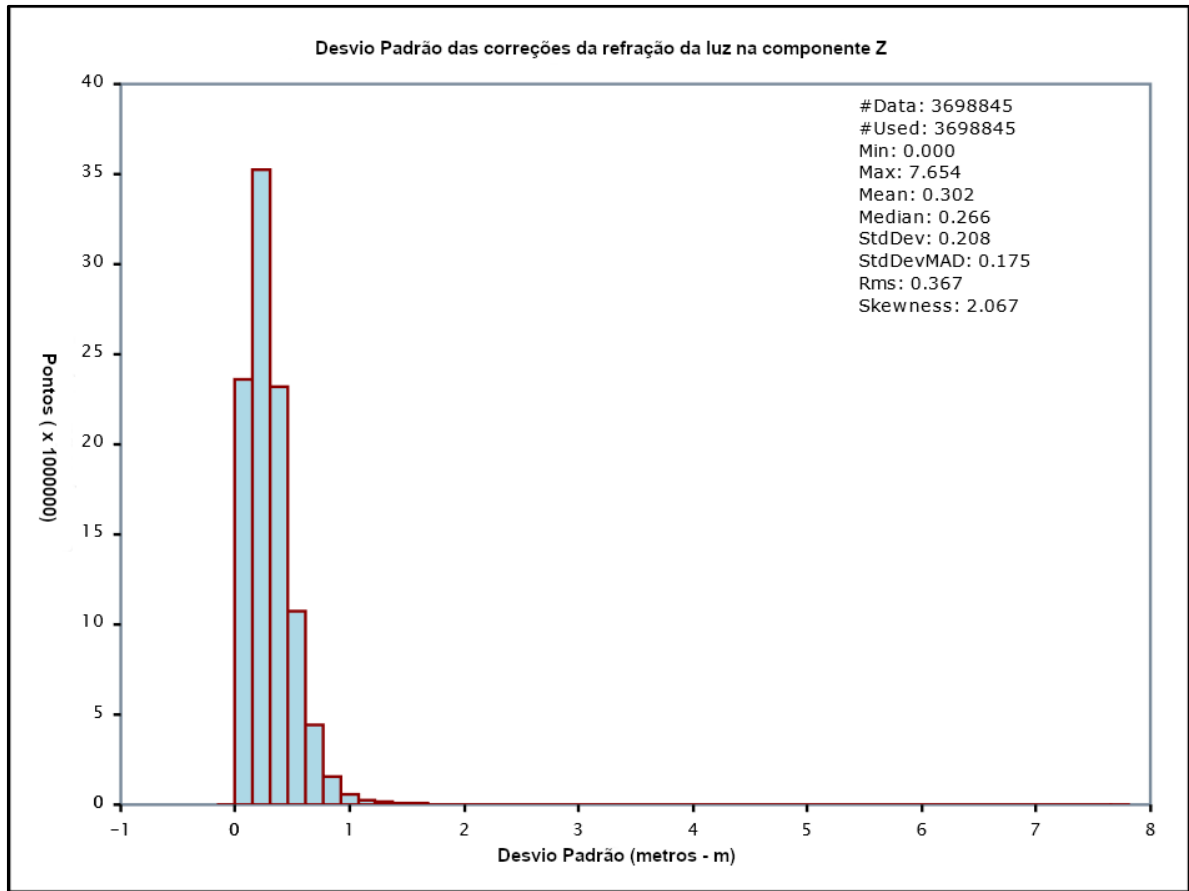
Fonte: O Autor.

Ao final da execução do módulo *Snellius* são geradas estatísticas relativas às correções da refração da luz na componente Z, bem como a distribuição de suas frequências representadas na forma de histograma (Figura 39).

Analisando a Figura 39 é possível observar que a maioria das correções de refração da luz aplicadas na componente Z estão abaixo de 1 metro. Existe uma assimetria em direção aos erros maiores, e não existem correções negativas, como é de se esperar pela teoria apresentada. O resultado estatístico contido na figura (canto superior direito) mostra que o valor médio da correção da refração da luz, nos valores de altimetria, corresponde a 0,302 metros e que o desvio padrão obtido, variável estatística que mede a precisão, é igual a $\pm 0,208$ m.

Após a correção da refração da luz utilizando o módulo *Snellius* do *software* OPALS, conclui-se a etapa da batimetria *multi-media* para o reservatório de Cachoeira, sendo obtido como produto desta etapa a nuvem de pontos com as correções da refração da luz corrigida nas coordenadas de cada ponto, havendo uma melhoria nos resultados, como proposto em um dos objetivos específicos.

Figura 39 - Histograma e resumo estatístico gerado pelo *Snellius* após a correção da refração da luz para a componente altimétrica (Z)

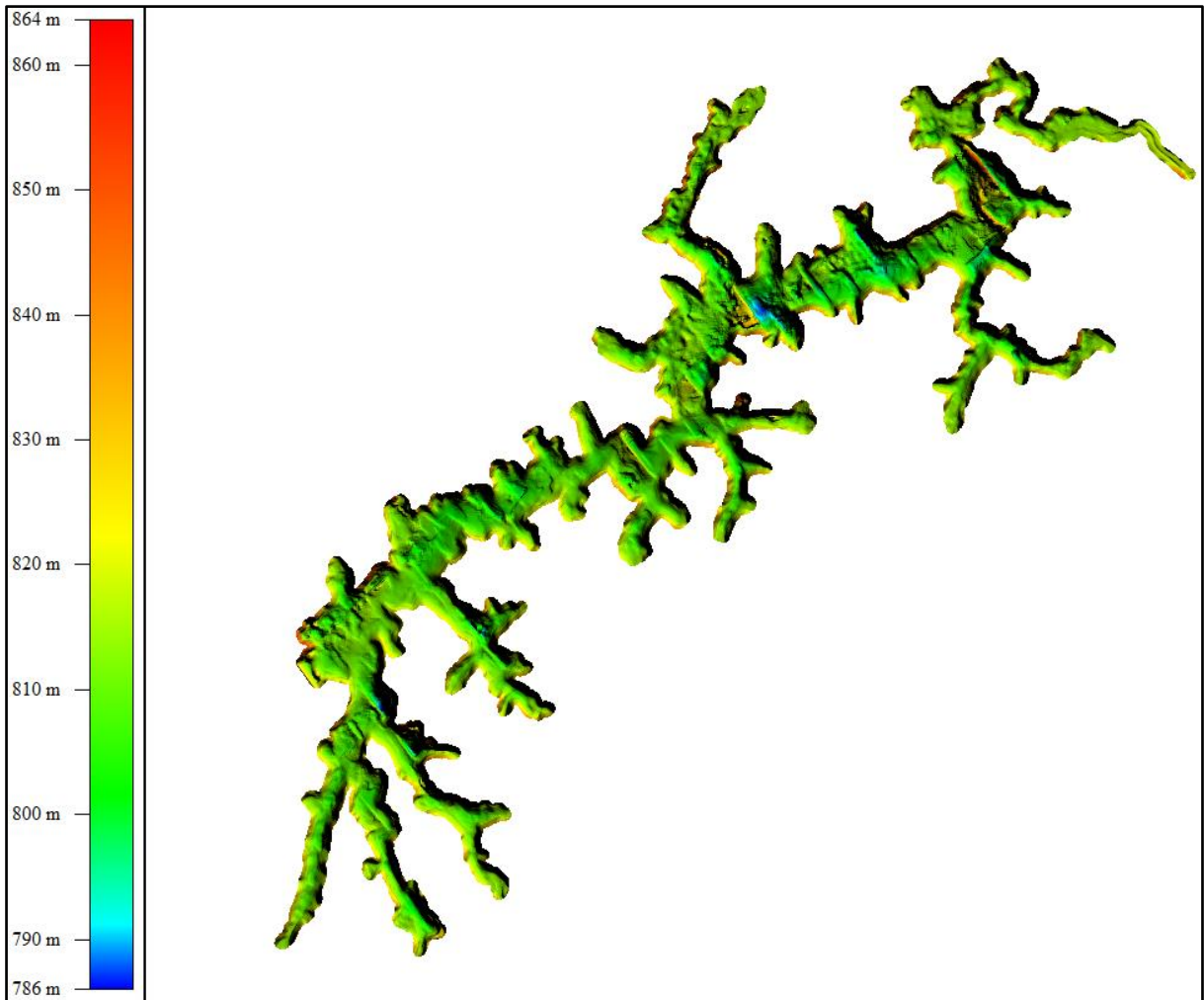


Fonte: O Autor.

Utilizando a nuvem de pontos corrigida, realizou-se a interpolação obtendo um MDE com uma malha regular de 3,5 metros, que será utilizado para avaliação comparativa com os pontos obtidos na batimetria convencional por *single-beam*.

A Figura 40 traz o MDE interpolado, com sua escala altimétrica que traz valores que variam de 786,041 metros até 863,616 metros. É importante dizer que os valores altimétricos são apresentados como altura geométrica.

Figura 40 - MDE interpolado por meio da batimetria *multi-média* que será avaliado em conjunto com os dados da batimetria convencional por *single-beam*



Fonte: O Autor.

4.6. BATIMETRIA CONVENCIONAL POR *SINGLE-BEAM*

A batimetria convencional por *single-beam* realizada nesta pesquisa, para o corpo d'água do reservatório de Cachoeira, foi realizada como forma de ter um parâmetro de comparação e referência e assim validar o modelo batimétrico derivado da técnica de batimetria *multi-média*, ou seja, foi considerada como *verdade* de campo para a topografia submersa do reservatório.

A coleta dos dados de batimetria convencional foi financiada com recursos próprios do pesquisador, sendo contratada uma empresa de capital privado para realizar o planejamento das linhas batimétricas a serem executadas, a coleta das sondagens e pós processamento destes dados. A empresa SABESP, apoiadora desta pesquisa,

disponibilizou o barco, combustível e equipe técnica para pilotar o barco nesta campanha.

A coleta destes dados de batimetria convencional foi necessária nesta pesquisa pois a SABESP disponibilizou ao pesquisador os últimos dados batimétricos realizados para o reservatório de Cachoeira, que ocorreu em um trabalho executado no ano 2008. Como se tem um intervalo de dez anos entre estes dados e a realização do voo aerofotogramétrico, considerou-se que poderiam ter ocorrido mudanças significativas no intervalo de tempo, não podendo ser empregado na validação do modelo batimétrico derivado da batimetria *multi-media*.

O planejamento das linhas batimétricas a serem realizados no reservatório de Cachoeira foram configurados considerando um traçado onde a coleta fosse possível de ser executada em um único dia de campo. Assim, foram planejados um total de 30 linhas em seção transversal, ao longo do corpo principal do reservatório com espaçamento médio entre elas de 400 metros (Figura 41).

É importante dizer que a coleta de dados ideal para o reservatório de Cachoeira, caso tivesse o objetivo de trazer uma representação mais detalhada do fundo topográfico, deveria apresentar uma configuração melhor, ou seja, ter um espaçamento menor entre as linhas batimétricas. Mas para fim de comparação, constitui uma quantidade significativa de pontos, como se destacará.

Figura 41 - Linhas de batimetria convencional planejadas para serem realizadas no corpo d'água do reservatório de Cachoeira. As linhas amarelas correspondem as seções batimétricas planejadas e o polígono branco o limite do corpo d'água do reservatório



Fonte: O Autor.

O trabalho de batimetria ocorreu no dia 16 de setembro de 2021, o que traz uma diferença temporal de aproximadamente três anos contados a partir da data da execução do voo aerofotogramétrico. Cabe ressaltar que esta diferença temporal ocorreu devido ao momento da pandemia pelo COVID-19.

Com a equipe reunida nas margens de acesso à rampa do reservatório de Cachoeira, foi iniciada a montagem do equipamento *single-beam* bem como o receptor GNSS, acoplando-os ao barco.

A embarcação utilizada neste trabalho foi um barco de alumínio do tipo voadeira (Figura 42). Inicialmente foi montado o receptor GNSS na lateral do barco, em uma haste de 2,00 m a qual na extremidade inferior foi acoplado o *single-beam*.

Figura 42 - Barco de alumínio do tipo voadeira, de propriedade da SABESP, utilizado na coleta de dados utilizando *single-beam*



Fonte: O Autor.

As Figura 43 e 44 mostram, respectivamente, a antena GNSS montada no barco e o equipamento *single-beam* utilizados na coleta de dados. Como se pode ver na Figura 43 no bastão de 2,00 m utilizado, foram acoplados na parte superior o receptor GNSS enquanto na parte inferior o *single-beam*. Neste bastão existe uma marcação feita por uma fita em azul, que indica onde o bastão deverá ser posicionado durante a coleta, ficando nivelado na altura da borda do barco, sendo a partir daí mensurados os *offsets* necessários no pós-processamento.

Os valores dos *offsets* obtidos foram:

- Distância do transdutor medida até a marcação azul do bastão: 0,70 m.
- Distância da antena do receptor GNSS medida até a marcação azul do bastão: 1,30 m.
- Distância da marcação azul do bastão medida até a lâmina d'água: 0,41 m.

- Distância da antena do receptor GNSS medida até a lâmina d'água: 1,70 m.

Figura 43 - Montagem do bastão contendo a antena GNSS na parte superior acoplado na embarcação



Fonte: O Autor.

Figura 44 - *Single-beam* modelo Bathy-500MF (*Ocean Data*) utilizado na coleta dos dados



Fonte: O Autor.

Ao final da montagem do equipamento e após carregar o traçado das linhas de batimetria no computador utilizado, iniciou-se a navegação aproximadamente as 08:30 hs da manhã registrando os dados batimétrico pelo *software Meri Data Acquisition* (MDCS).

No início do trabalho, após uma conversa realizada com o técnico da empresa contratada houve a sugestão de deixar a coleta ativada durante todo o percurso, uma vez que teríamos poucas linhas batimétricas.

Por volta das 15:00 hs, mais precisamente nas proximidades das coordenadas geográficas 23°01'38.08" S/ 46°15'44.91" W o equipamento *single-beam* atingiu uma estrutura de concreto submersa ao reservatório de Cachoeira, sendo danificado e não havendo mais a possibilidade de continuar o trabalho, encerrando a coleta e realizada a desmontagem do equipamento.

Mesmo não sendo cumprida a batimetria para todas as linhas planejadas, houve uma quantidade de dados representativa do reservatório, dado que o equipamento *single-beam* realizou a coleta continuamente durante toda navegação.

O pós-processamento dos dados foi executado no escritório da empresa contratada, sendo realizado o tratamento dos dados originais batimétricos adquiridos, o processamento da trajetória de navegação do barco, registrada pelo receptor GNSS configurado com taxa de coleta de 1 segundo, com georreferenciamento direto das sondagens (*software Meridata post-processing software – MDPS*) e a conversão das medidas de profundidades em elevações (altura geométrica).

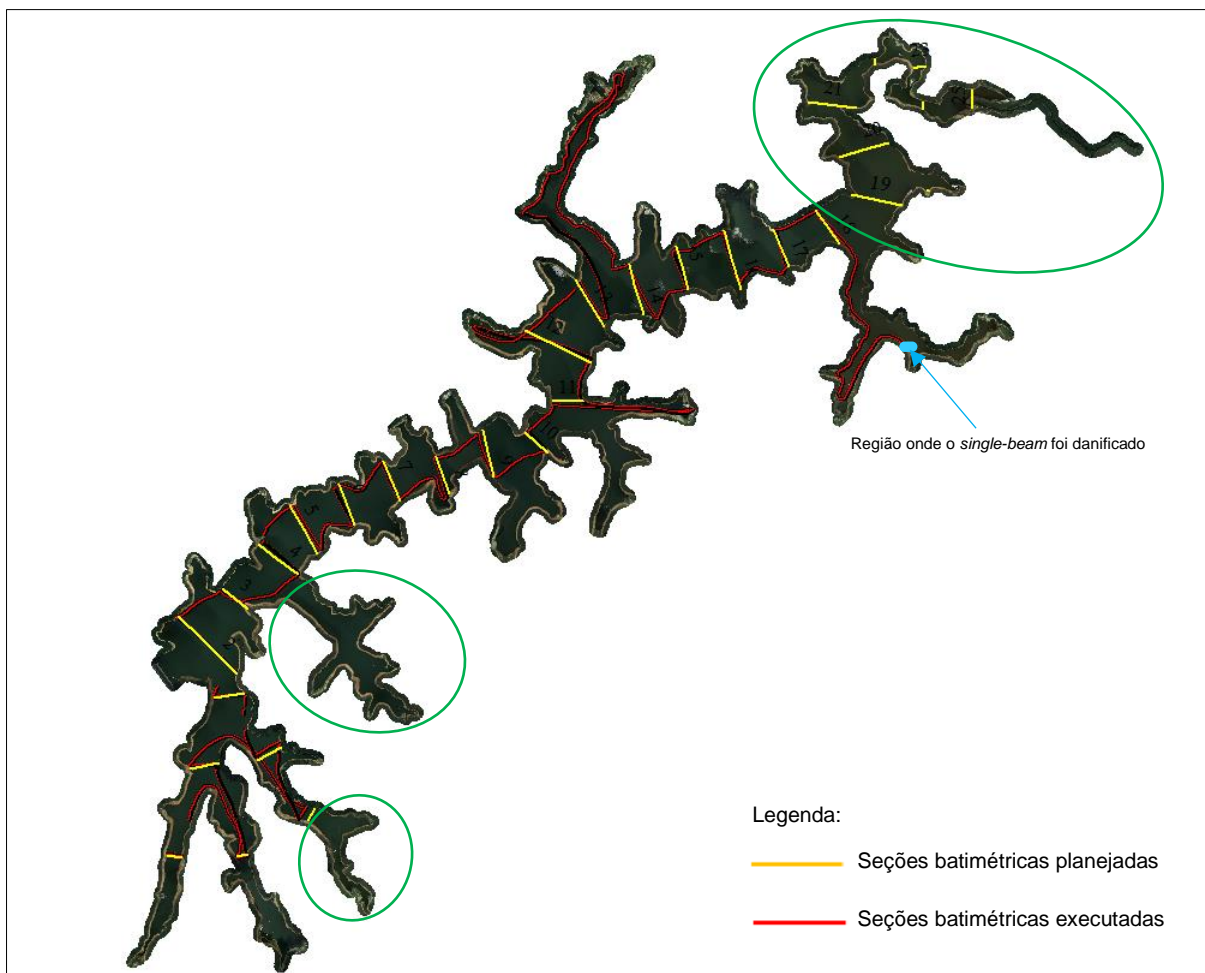
Segundo a empresa, a trajetória registrada pelo receptor GNSS foi processada utilizando as efemérides precisas fornecidas por meio de um serviço pago pela empresa à fabricante do equipamento, dispensando a utilização de uma base GNSS em solo com antena UHF para transmissão das correções da base para a antena instalada no barco.

A informação da cota do reservatório, necessária para transformar as medidas de profundidade em elevações, foi obtida diretamente no *website* da SABESP (<http://mananciais.sabesp.com.br/DadosTelemetricos>), que traz dados referentes ao nível d'água, vazão, volume e precipitação em todos os reservatórios geridos pela SABESP. Para o dia em que a coleta dos dados batimétricos foi realizada, o reservatório de Cachoeira apresentou a cota da lâmina d'água igual a 815,290 m.

Ao final da conclusão do processamento realizado pela empresa contratada, foi disponibilizado como produto da batimetria um arquivo contendo as coordenadas X, Y e Z da batimetria realizada. A Figura 45 mostra o arquivo final dos pontos batimétricos sobrepostos ao planejamento das linhas batimétricas.

O arquivo contendo as informações da batimetria convencional realizada contém 61.307 pontos os quais apresentam uma distância média entre eles na ordem de 0,42 m.

Figura 45 - Sobreposição dos dados batimétricos coletados (linhas na cor vermelha) com as linhas planejadas (linhas na cor amarela). Os círculos na cor verde indicam regiões do reservatório que não foram coletadas informações pela batimetria convencional.



Fonte: O Autor.

Por mais que todas as linhas batimétricas planejadas não tiveram a batimetria realizada por conta do equipamento ter sido danificado, o fato de manter o equipamento ligado durante todo percurso realizado possibilitou uma coleta de dados bastante significativa (mais de 60.000 pontos). A desvantagem no caso está relacionada apenas ao fato de que não existem dados batimétricos em todas as regiões do reservatório, mas a comparação consiste numa amostragem significativa.

A análise realizada sobre os pontos coletados com a batimetria convencional mostrou que, dentre a amostra de pontos, a maior e menor profundidade para o reservatório de Cachoeira, são 24,319 m e 0,616 m, respectivamente.

5 ANÁLISE DA QUALIDADE DO MODELO BATIMÉTRICO ORIUNDO DA BATIMETRIA *MULTI-MEDIA* E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 VISÃO GERAL DO PROCESSO

Neste Capítulo serão apresentadas as análises realizadas no modelo batimétrico gerado pela batimetria *multi-media*, para a área do reservatório de Cachoeira. As avaliações realizadas consistiram em comparar as altitudes geométricas⁶ do modelo com suas respectivas provenientes do levantamento batimétrico convencional realizado com o *single-beam*, tido como parâmetro de comparação.

Nessa análise consideramos, por analogia, os parâmetros estabelecidos pelo Decreto Federal nº. 89.817, de 20 de junho de 1984, para produtos cartográficos sistemáticos. Poderíamos ter considerado a normativa para produtos produzidos em meio digital (Decreto 89.817/ ET-CQDG), que é mais exigente, trazendo uma classe a mais que o estabelecido pela normativa em sua versão original. Sendo as duas normativas similares no que tange aos critérios de avaliação, neste caso, optamos pelo Decreto Federal nº. 89.817, de 20 de junho de 1984, devido à não equivalência, em termos de precisão exigida, entre uma cartografia digital e o processo de batimetria, que mapeia fundos de mares, rios, lagoas e barragens, cujo relevo submerso, em geral, sofre mais mudanças e mais rápidas ao longo do tempo.

Os critérios de análises foram aplicados à parte seca e ao corpo d'água do reservatório. A parte seca do reservatório foi avaliada para que se pudesse conhecer a qualidade da correlação de imagens realizado com o algoritmo FBM, dado que no dia do voo o nível de operação do reservatório era menor que o do dia em que se realizou a batimetria convencional. O teste do modelo gerado para a região do corpo d'água objetiva avaliar até qual profundidade a batimetria *multi-media* se mostrou eficiente, dadas as condições físicas do corpo d'água e as limitações da técnica utilizada, estudando o decréscimo da precisão com a profundidade, em função, principalmente da turbidez e a degradação nos locais em que se apresenta o reflexo solar sobre a superfície d'água.

A análise do modelo batimétrico gerado iniciou-se com a sobreposição dos pontos da batimetria convencional a ele e extraindo automaticamente as respectivas elevações

⁶ Altitude geométrica, também conhecida como altitude elipsoidal ou altitude geodésica.

do modelo gerado. Nesta etapa obteve-se um arquivo vetorial de pontos (*shapefile*) contendo dois atributos para cada ponto: altitude geométrica da batimetria convencional (h_{bc}), que já estava contido na forma de atributo do arquivo vetorial utilizado, e a altitude geométrica extraída do modelo derivado da batimetria *multi-media* (h_{bm}).

Os erros altimétricos (Δh) em cada posição avaliada foram determinados pela subtração entre as duas altitudes (Equação 5.1).

$$\Delta h = h_{bc} - h_{bm} \quad (5.1)$$

Para a parte seca do reservatório, os pontos da batimetria convencional coincidentes apresentam profundidades que variam de 0,616 m a 2,00 m. Assim, a avaliação da qualidade do modelo foi realizada considerando este intervalo.

Como a parte submersa apresenta um intervalo maior de profundidade (variando entre 2,01 m e 24,319 m) optou-se por realizar um fatiamento do modelo com intervalo a cada 1 m de variação. Esta estratégia teve como objetivo avaliar a degradação da qualidade do modelo (devido a limitação da técnica da batimetria *multi-media*) com o aumento da profundidade, definindo até qual profundidade o modelo apresenta qualidade considerando uma escala de mapeamento igual ou inferior a 1:2.000⁷.

Como em alguns momentos iremos trazer medidas de profundidades e em outros valores de altitudes geométricas, julga-se conveniente trazer aqui uma correlação entre ambas medidas (profundidades x altitudes geométricas) encontradas para o reservatório de Cachoeira, de modo a auxiliar na compreensão das análises apresentadas (Tabela 5).

Tabela 5 - Correlação entre medidas de profundidades e altitudes geométricas extraídas da batimetria convencional realizada para o reservatório de Cachoeira

Profundidades (m)	Altitudes Geométricas (m) – batimetria convencional
0,616 - 2,00	814,704 - 813,321
2,00 - 3,00	813,320 - 812,321
3,00 - 4,00	812,320 - 811,321
4,00 - 5,00	811,320 - 810,321
5,00 - 6,00	810,320 - 809,321

⁷ A escala de mapeamento 1:2.000 foi escolhida nesta análise devido ao fato da sua utilização efetiva em aplicações mais precisas como exemplo cálculo do volume de um reservatório. Constatou-se também que, nesse caso concreto, não se atinge uma qualidade razoável na escala 1:1.000.

6,00 - 7,00	809,320 - 808,321
7,00 - 8,00	808,320 - 807,321
8,00 - 9,00	807,320 - 806,321
9,00 - 10,00	806,320 - 805,321
10,00 - 11,00	805,320 - 804,321
11,00 - 12,00	804,320 - 803,321
12,00 - 13,00	803,320 - 802,321
13,00 - 14,00	802,320 - 801,321
14,00 - 15,00	801,320 - 800,321
15,00 - 16,00	800,320 - 799,321
16,00 - 17,00	799,320 - 798,321
17,00 - 18,00	798,320 - 797,321
18,00 - 19,00	797,320 - 796,321
19,00 - 20,00	796,320 - 795,321
20,00 - 21,00	795,320 - 794,321
21,00 - 22,00	794,320 - 793,321
22,00 - 23,00	793,320 - 792,321
23,00 - 24,319	792,320 - 791,001

Fonte: O Autor.

A Figura 46 apresenta o fluxograma metodológico empregado na análise da qualidade do modelo derivado da batimetria *multi-media*.

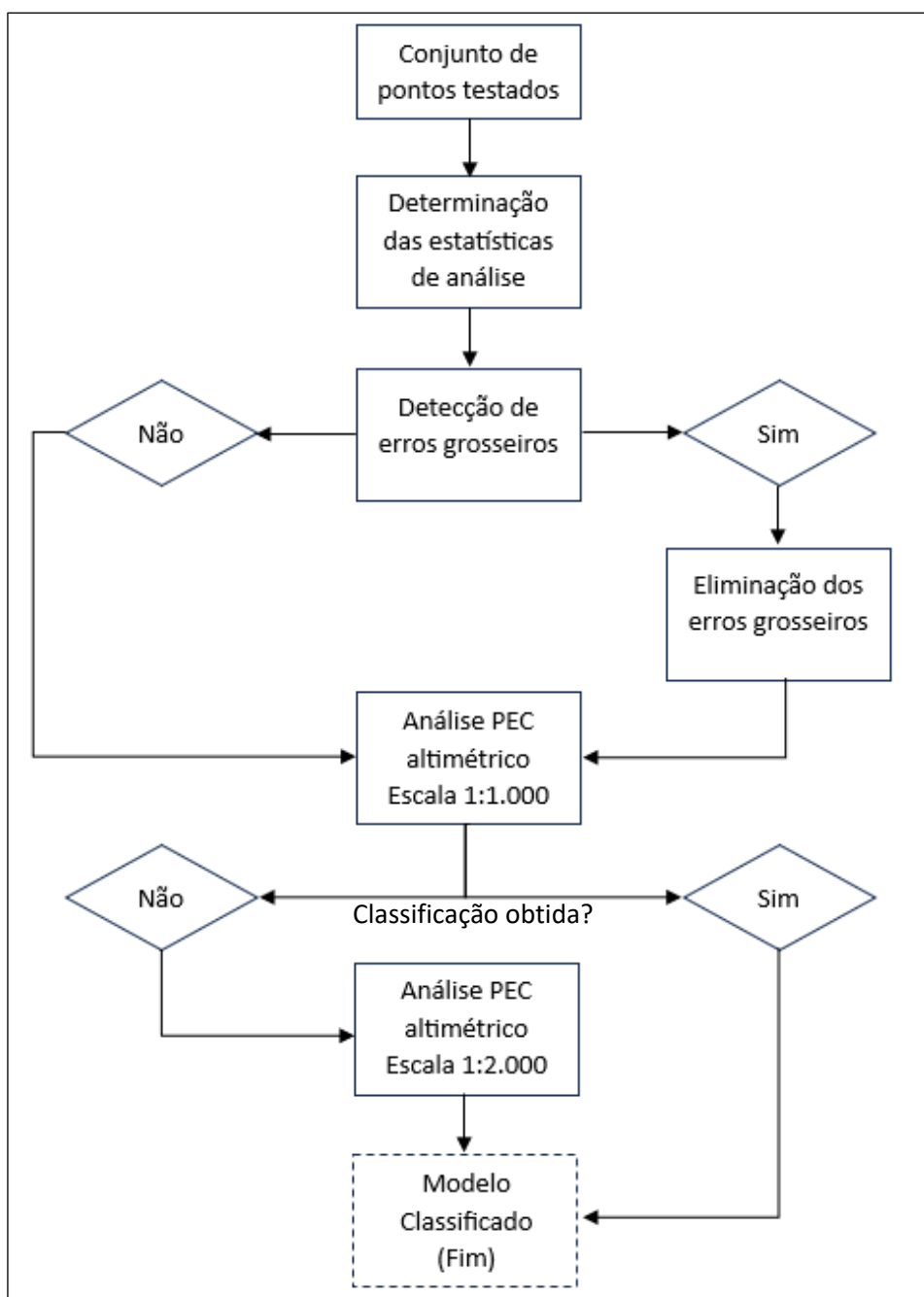
Inicialmente o conjunto de pontos (separados por intervalo de profundidade) contendo os valores dos erros altimétricos calculados, tiveram suas estatísticas determinadas. A partir das variáveis estatísticas média ($\overline{\Delta h}$) e desvio padrão (σ) foram determinados os valores que correspondem a erros grosseiros (EG) da amostra conforme Equação 5.2, ou seja, considera-se erro grosseiro aqueles que em módulo está fora do intervalo definido por essa equação.

$$EG = \overline{\Delta h} \pm 3.(\sigma) \quad (5.2)$$

Caso sejam detectados erros grosseiros na amostra de pontos testada, eles são removidos do conjunto e as estatísticas novamente recalculadas, seguindo para avaliação da qualidade dos pontos seguindo as especificações do PEC Altimétrico para a escala 1:1.000. Caso não sejam detectados erros grosseiros, parte-se diretamente para a avaliação do PEC também na mesma escala. Se as classes A, B ou C do PEC altimétrico na escala 1:1.000 não sejam atingidas, parte-se para a mesma avaliação considerando a escala 1:2.000.

Será considerado com qualidade o conjunto de pontos testados e classificados na classe A, B ou mesmo C, na escala 1:2.000, encerra-se o processo. É importante dizer que esta metodologia apresentada foi aplicada aos subconjuntos de pontos da batimetria convencional coincidentes com a parte seca e do corpo d'água do modelo gerado.

Figura 46 - Fluxograma apresentando a metodologia empregada na análise da qualidade dos pontos contendo os valores altimétricos extraídos da batimetria *multi-media*.



Fonte: O Autor.

5.2. DIRETRIZES ESTABELECIDAS NA AVALIAÇÃO DO PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICO (PEC) CONFORME DECRETO 89.817

A Tabela 6 apresenta os valores numéricos dos parâmetros estabelecidos pela norma de controle de qualidade geométrica de documentos cartográficos estabelecidos no Decreto Federal nº. 89.817, de 20 de junho de 1984.

Tabela 6 - Valores estabelecidos pelo Decreto nº 89.817 para controle da qualidade dos produtos cartográficos

Classe	PEC planimétrico	Erro Padrão	PEC altimétrico	Erro Padrão
A	0,5 mm x escala	0,3 mm x escala	1/2 equidistância	1/3 equidistância
B	0,8 mm x escala	0,5 mm x escala	3/5 equidistâncias	2/5 equidistâncias
C	1,0 mm x escala	0,6 mm x escala	3/4 equidistâncias	1/2 equidistância

Fonte: Decreto nº 89.817.

Pela Tabela 6, a primeira coluna apresenta as 3 classes definidas pelo PEC, enquanto a segunda e terceira coluna, estabelecem respectivamente, os valores aceitos em cada classe para os Padrões de Exatidão Cartográfica (PEC) e o Erro Padrão (EP para a planimetria, mediante escala de mapeamento considerada. A quarta e quinta coluna, trazem respectivamente, as mesmas variáveis descritas anteriormente, porém para a componente altimétrica, levando em consideração as equidistâncias entre as curvas de nível, que são determinadas em relação a escala de mapeamento (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores de referência da equidistância entre as curvas de nível em relação a escala do mapa.

Escala do mapa	Equidistância das curvas de nível (m)
1:1.000	1,00
1:2.000	2,00
1:5.000	5,00
1:10.000	10,00

Fonte: Decreto nº 89.817.

Para determinar os valores de referência altimétricos (PEC e EP) em cada uma das classes testadas, apresentados na Tabela 6, os valores estabelecidos são multiplicados pelos respectivos valores da equidistância entre as curvas de nível na escala de interesse. Assim, em cada aplicação ou mapa, deve-se conhecer previamente a escala e a equidistância entre as curvas de nível. Por exemplo, na

escala 1:1.000, classe A, o PEC planimétrico é 0,50 m (0,50 mm multiplicado por 1.000) o PEC altimétrico é também 0,50 m (1/2 multiplicado por 1,0 m, que é a equidistância das curvas de nível nesta escala de mapeamento).

O Decreto 89.817 estabelece que 90% dos pontos do conjunto testado devem apresentar os erros calculados com valores iguais ou abaixo do PEC correspondente, ou seja, apenas 10% dos pontos podem apresentar valores de erros superiores ao estabelecido no PEC para a classe testada.

Com o intuito de avaliar a componente altimétrica, inicialmente define-se a escala de mapeamento desejada, como por exemplo 1:1.000. Para esta escala tem-se que a equidistância entre as curvas de nível considerada é de 1,0 m. Assim, são calculados os valores de referência do PEC Altimétrico para cada classe.

O processo é iniciado pela classe A, onde pelo exemplo, o valor de referência calculado para o PEC é de 0,50 m e, caso 90% dos pontos testados estejam abaixo deste valor, o processo é concluído sendo atribuída da Classe A para o produto testado. Caso contrário, procede-se ao teste para a qualidade B, onde o valor de tolerância do PEC aumenta para 0,80 m. Se ainda não for aprovado, testa-se para a qualidade C com o valor do PEC igual a 1,0 m.

Se o conjunto de pontos testados não satisfizer os critérios da qualidade estabelecida na classe C, o processo é repetido para a escala 1:2.000, sendo novamente testadas as classes A (PEC de 1,0 m), B (PEC de 1,6 m) e C (PEC de 2,0 m), respectivamente. Esse procedimento continua conforme necessário e ao final, realiza-se uma avaliação da utilidade do produto com qualidade atribuída, para a escala definida. O usuário deve avaliar se a qualidade encontrada é suficiente para o caso ou problema específico em questão.

Antes da análise final do PEC, é recomendável avaliar as estatísticas calculadas para o conjunto de pontos com o intuito de detectar a presença de erros grosseiros e assim eliminá-los do conjunto amostral. Esta análise também permite verificar a normalidade da distribuição de erros, o que é feito analisando os valores de curtose e assimetria, que devem ser baixos (menor que 1 ou 0,5), mas isso não impede continuar o processo de avaliação. O desvio-padrão, um indicador da precisão do levantamento, é um parâmetro utilizado na norma americana, e será calculado, ainda que aqui

adotamos a citada normativa brasileira. Detalhes adicionais podem ser encontrados nessa norma e em obras como a de Nero (2005).

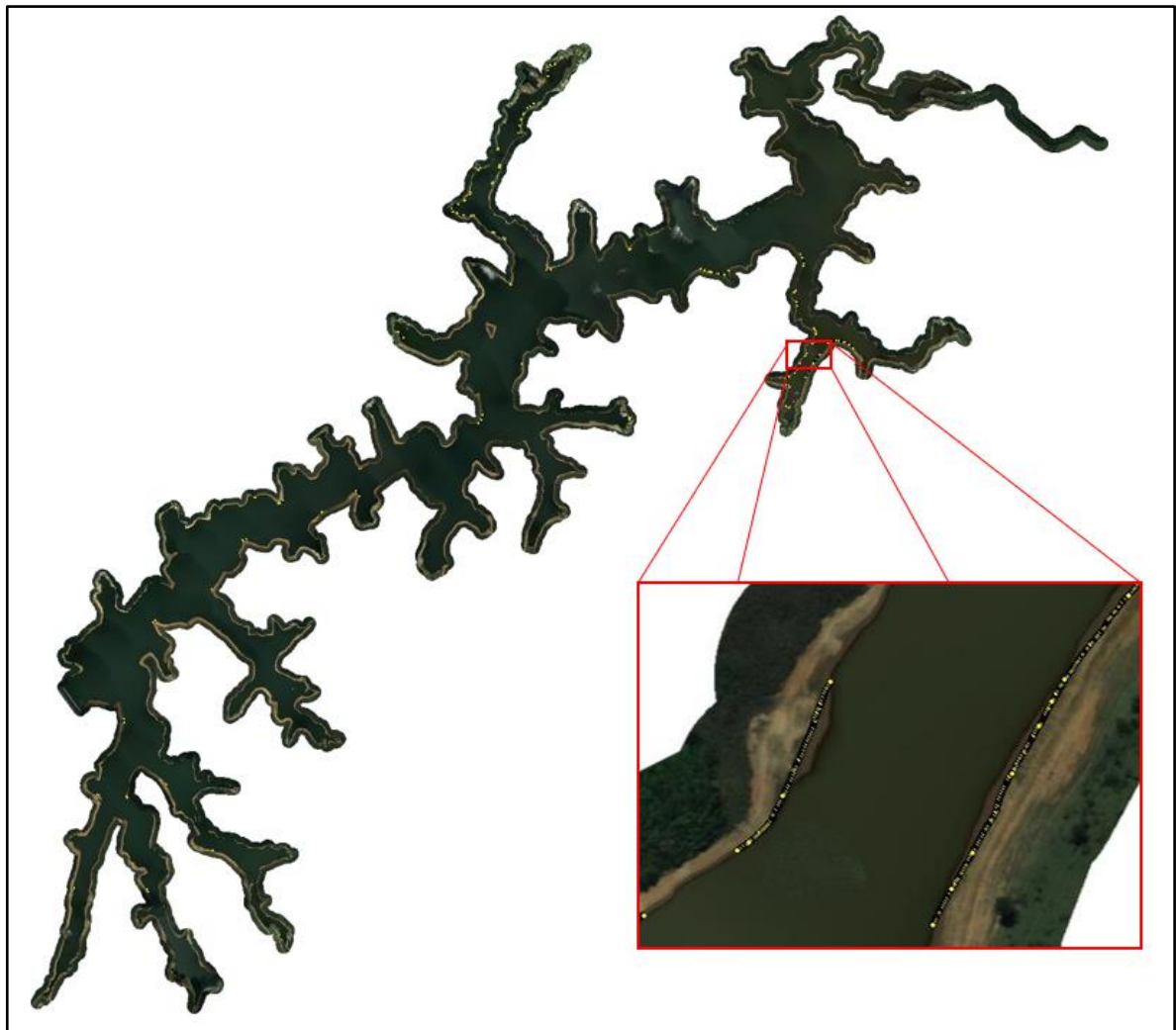
5.3. AVALIAÇÃO DA PARTE SECA DO RESERVATÓRIO

Para análise da topografia compreendida na parte seca do reservatório do modelo derivado da batimetria *multi-media*, foram identificados 4905 pontos da batimetria convencional coincidentes com esta região do modelo na época do voo fotogramétrico. Conforme já mencionado anteriormente, estes pontos apresentam profundidades registrada pelo *single-beam* compreendidas entre 0,616 m e 2,00 m, com relação ao nível de água do reservatório no dia da realização da batimetria convencional. A profundidade mínima registrada corresponde ao fato de que a embarcação contendo o *single-beam* acoplado, por questões de navegabilidade e segurança para com o equipamento, não conseguiu se aproximar muito das margens e assim não registrou profundidades inferiores a 0,616 m.

Em resumo, os pontos registrados pela batimetria convencional serviram para validar os pontos da nuvem fotogramétrica derivados da correlação de imagens (utilizando o algoritmo FBM), uma vez que por estarem acima do nível d'água do reservatório, não se aplicam as correções de deslocamentos aparentes. Assim, a Figura 47 apresenta de uma maneira geral um trecho em destaque, contendo alguns pontos da batimetria convencional que foram utilizados para validar a parte seca do modelo constituído.

Para uma melhor compreensão da Figura 47, tem-se que os pontos da batimetria convencional (representados pelos pontos em amarelo) estão nitidamente localizados na parte seca do reservatório, vistos na sobreposição com o ortomosaico. Como mencionado anteriormente, este fato é devido ao nível do reservatório de Cachoeira, no dia da execução da batimetria convencional, ser superior ao nível do reservatório registrado no dia do voo aerofotogramétrico.

Figura 47 - Identificação dos pontos da batimetria convencional que são coincidentes com a parte seca do reservatório, na época do recobrimento fotogramétrico



Fonte: O Autor.

A Tabela 8 apresenta os resultados estatísticos calculados para os pontos localizados na parte seca do reservatório contendo erros grosseiros (A) e após a sua eliminação do conjunto de pontos testados (B).

Tabela 8 - Estatísticas calculadas para a parte seca do reservatório contendo erros grosseiros (A) e após sua eliminação na análise (B)

Parte Seca		Parte Seca	
Média	0,000	Média	-0,005
Erro padrão	0,004	Erro padrão	0,004
Mediana	-0,045	Mediana	-0,047
Modo	-0,163	Modo	-0,163
Desvio padrão	0,294	Desvio padrão	0,281
Variância da amostra	0,086	Variância da amostra	0,079
Curtose	0,981	Curtose	0,363

Assimetria	0,576	Assimetria	0,421
Intervalo	2,260	Intervalo	1,745
Mínimo	-1,034	Mínimo	-0,875
Máximo	1,226	Máximo	0,870
Soma	0,106	Soma	-25,918
Contagem	4905	Contagem	4873

(A) (B)

Fonte: O Autor.

A Tabela 8 mostra que 32 pontos foram classificados como erros grosseiros, dado que em (A), a quantidade de pontos do conjunto era de 4905 e em (B), este valor foi para 4873. Após remoção dos pontos classificados como erros grosseiros da amostra houve melhoras nos resultados para algumas variáveis estatísticas como Desvio Padrão, Assimetria e Curtose. Também não existe tendência relevante, já que a média é muito próxima de zero (-0,005 m).

Para a variável curtose e para a assimetria, a remoção dos erros grosseiros trouxe a normalidade na distribuição dos dados (valores abaixo de 0,5). A precisão encontrada para a parte seca modelo gerado é de 0,281 m (desvio padrão após a eliminação dos erros grosseiros).

Os pontos classificados como erros grosseiros foram avaliados em suas posições sobre o ortomosaico, porém, não foram detectados nenhuma ocorrência especial no ortomosaico que viesse a explicar tal fato. Por se tratar de uma região de transição entre a parte seca e parte do corpo d'água, sugere-se que nestas localidades houve alguma variação pontual na topografia ou vegetação, a qual influenciou no resultado nestas regiões específicas.

Uma conclusão preliminar para a parte seca do reservatório pode ser trazida. No período de três anos considerado entre a aquisição das imagens aéreas para aplicação da batimetria *multi-média* e a realização da batimetria convencional, a região da borda do reservatório (zona de transição entre parte seca e o corpo d'água) não apresentou variação topográfica considerável.

O desvio-padrão, que mede a precisão (0,294 m e 0,281 m) mostra que esse parâmetro se encontra muito próximo dos 0,25 m indicados na literatura, para registros de profundidades realizados com o sistema LiDAR batimétrico, valor apontado por Vosselman e Mass (2010).

Para avaliar a qualidade deste segmento do mapeamento, conforme a norma brasileira, analisamos 4783 pontos. Destes, 417 pontos (8,71%) apresentaram os erros altimétricos com valores superiores a 0,50 metros. Assim, sendo abaixo de 10%, o produto ainda se qualifica como classe A do PEC altimétrico na escala 1:1.000, o que representa um resultado positivo. Esta análise foi realizada em um contexto específico, durante um período de seca, quando fenômenos como o *sun-glint* e a refração não estavam presentes, por não haver água nessa região.

A Tabela 9 apresenta o resumo da avaliação realizada para a parte seca do reservatório, onde as profundidades registradas pelo sonar não ultrapassam 2,00 m.

Tabela 9 - Tabela resumo da análise do modelo topográfico gerado para a parte seca do reservatório

Variável analisada	Valores obtidos
Tamanho da amostra (pontos)	4873
Escala pretendida	1:1.000
Quantidade de pontos com erro acima de 0,50 m	417
Porcentagem dos pontos acima de 0,50 m	8,71%
Qualidade PEC Decreto 89.817	A
Desvio Padrão (m)	0,28

Fonte: O Autor.

5.4. AVALIAÇÃO DA TOPOGRAFIA SUBMERSA NO MODELO DERIVADO DA BATIMETRIA *MULTI-MEDIA*

Nesta seção será detalhada toda a análise realizada para o conjunto amostral de pontos registrado pela batimetria convencional no corpo d'água do reservatório, composto por 56.413 pontos. O objetivo deste estudo consiste em determinar a máxima profundidade do reservatório que, por meio do modelo derivado da batimetria *multi-media*, apresenta qualidade altimétrica nas classes A ou B do PEC (para a escala de mapeamento máxima 1:2.000), em outras palavras, até qual profundidade do reservatório de Cachoeira a técnica da batimetria *multi-media* se faz eficiente, por ter uma qualidade compatível com a precisão desejável para essa aplicação.

Como estratégia de análise a priori, foi realizada a divisão do conjunto amostral em subconjuntos, considerando um intervalo a cada 1,00 metro, iniciando em 2,01 metros

até a profundidade máxima (24,319 m). Para os 21 conjuntos de pontos (profundidades) analisados, foram calculadas as variáveis estatísticas conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Estatísticas calculadas para cada intervalo de profundidade registrada pelo *single-beam* para o reservatório de Cachoeira

Intervalo Profundidade	2 m † 3 m	3 m † 4 m	4 m † 5 m	5 m † 6 m	6 m † 7 m	7 m † 8 m	8 m † 9 m	9 m † 10 m
Média	-0,665	-0,903	-1,323	-2,051	-2,887	-4,870	-4,886	-5,181
Erro padrão	0,013	0,012	0,025	0,040	0,051	0,108	0,073	0,071
Mediana	-0,542	-0,870	-1,313	-1,980	-2,536	-3,294	-4,033	-4,665
Modo	-0,576	-0,819	-0,947	-2,130	-2,399	-3,144	-5,082	-2,288
Desvio padrão	0,955	0,857	1,543	2,287	2,647	6,525	4,082	3,590
Variância da amostra	0,912	0,734	2,382	5,232	7,006	42,573	16,661	12,885
Curtose	13,284	5,598	3,084	7,391	8,719	7,898	11,025	7,851
Assimetria	-3,082	-1,133	-0,160	-1,498	-2,074	-2,661	-2,542	-2,060
Intervalo	7,225	8,467	11,801	18,652	20,848	37,275	30,707	28,016
Mínimo	-6,049	-7,114	-8,315	-15,027	-17,151	-33,613	-28,714	-27,099
Máximo	1,176	1,353	3,486	3,625	3,697	3,662	1,993	0,917
Soma	-3804,087	-4552,139	-4902,691	-6582,376	-7883,560	-17858,670	-15131,182	-13144,445
Contagem	5722	5039	3706	3209	2731	3667	3097	2537

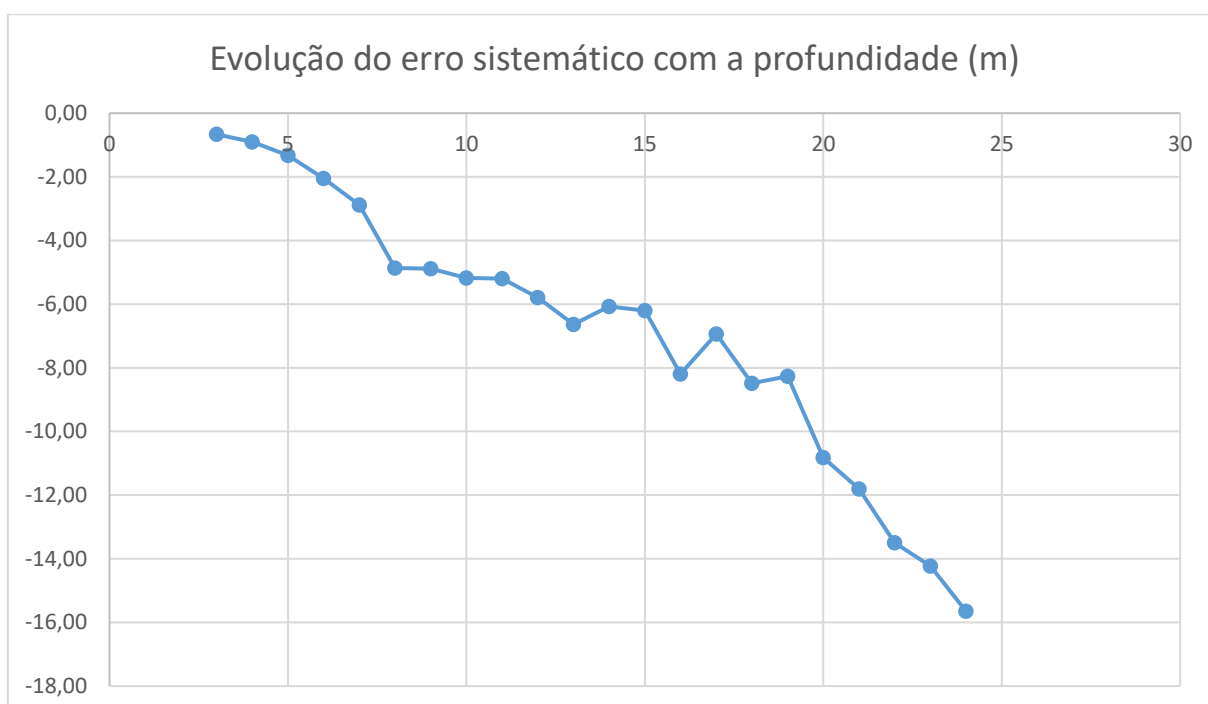
Intervalo Profundidade	10 m † 11 m	11 m † 12 m	12 m † 13 m	13 m † 14 m	14 m † 15 m	15 m † 16 m	16 m † 17 m	17 m † 18 m
Média	-5,200	-5,794	-6,638	-6,071	-6,208	-8,199	-6,936	-8,483
Erro padrão	0,056	0,074	0,070	0,062	0,103	0,092	0,152	0,109
Mediana	-5,060	-5,392	-6,865	-6,168	-7,946	-9,673	-9,508	-9,266
Modo	-4,651	-3,981	-7,355	-8,053	-5,004	-10,181	-7,910	-6,783
Desvio padrão	2,992	3,960	3,650	3,300	5,578	5,232	7,160	4,518
Variância da amostra	8,953	15,684	13,326	10,891	31,115	27,379	51,267	20,415
Curtose	8,561	6,210	2,255	1,699	-0,013	3,438	0,449	2,661
Assimetria	-2,005	-1,688	-0,032	0,389	1,028	1,809	1,169	1,261
Intervalo	25,575	27,660	24,397	26,182	24,879	28,152	30,342	27,159
Mínimo	-25,404	-23,505	-20,314	-20,265	-15,782	-15,961	-18,234	-16,093
Máximo	0,171	4,155	4,083	5,917	9,097	12,191	12,108	11,066
Soma	-14917,840	-16542,103	-17941,753	-17424,316	-18144,706	-26497,737	-15418,049	-14658,195

Contagem	2869	2855	2703	2870	2923	3232	2223	1728
Intervalo Profundidade	18 m f 19 m	19 m f 20 m	20 m f 21 m	21 m f 22 m	22 m f 23 m	23 m f 25 m		
Média	-8,267	-10,817	-11,806	-13,500	-14,227	-15,651		
Erro padrão	0,141	0,085	0,101	0,183	0,219	0,222		
Mediana	-10,054	-11,509	-10,603	-12,043	-13,271	-14,865		
Modo	-5,068	-12,643	-9,490	-17,895	-20,442	-14,559		
Desvio padrão	5,740	3,458	2,878	4,559	3,872	3,438		
Variância da amostra	32,944	11,958	8,281	20,780	14,995	11,821		
Curtose	3,419	10,046	0,522	-1,344	-0,717	-0,802		
Assimetria	1,840	2,312	-0,973	-0,216	-0,594	-0,603		
Intervalo	27,257	26,830	15,224	15,939	15,212	11,445		
Mínimo	-17,092	-18,547	-19,314	-20,873	-21,098	-21,810		
Máximo	10,165	8,283	-4,090	-4,934	-5,886	-10,365		
Soma	-13764,726	-17924,187	-9527,107	-8370,034	-4452,945	-3756,183		
Contagem	1665	1657	807	620	313	240		

Fonte: O Autor.

Uma primeira constatação analisando a média é que existe um erro sistemático negativo que cresce com a profundidade. Isto é, a batimetria *multi-média* tende a fornecer valores menores que o real (batimetria convencional). Estudos futuros podem aprofundar nas causas e talvez modelar esse fator e corrigir este efeito na batimetria *multi-média*. A Figura 48 apresenta o gráfico gerado ilustrando o comportamento do erro sistemático (por meio do desvio padrão) com o aumento da profundidade.

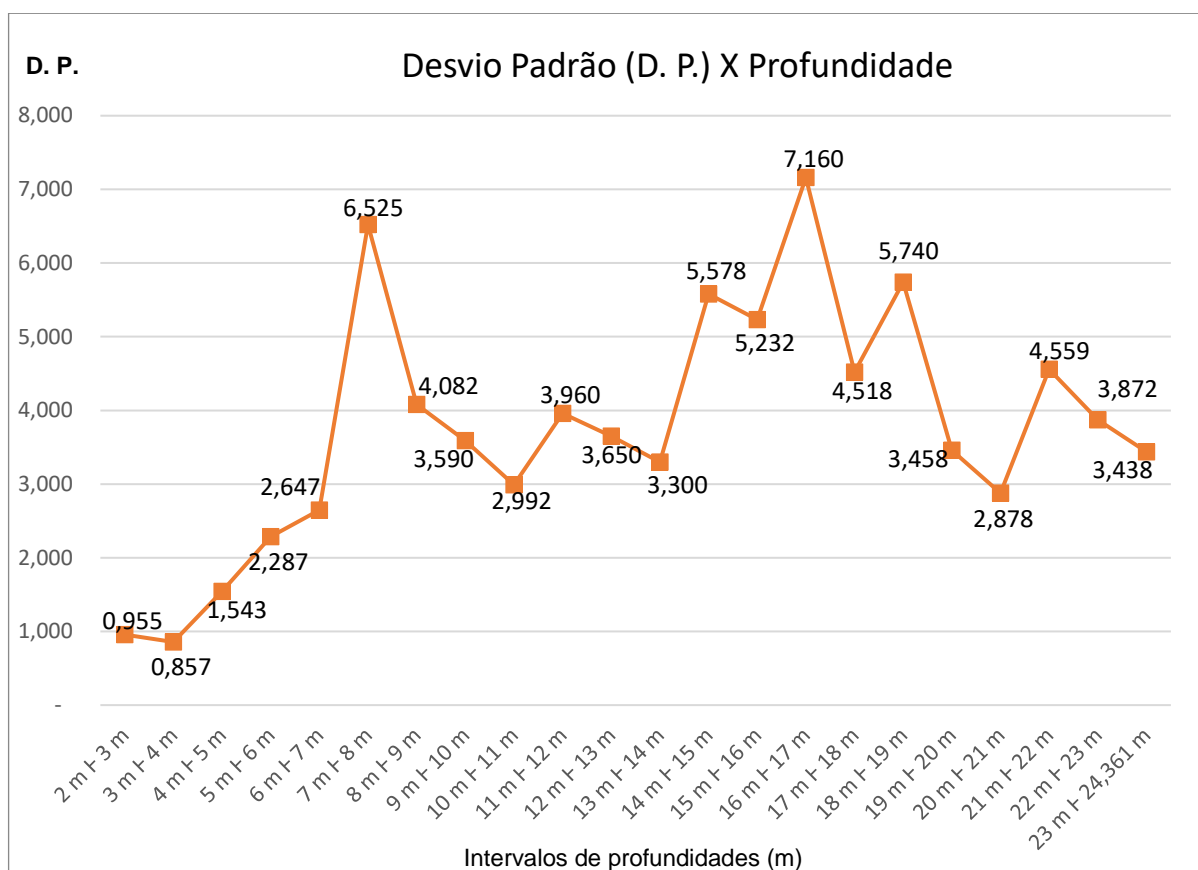
Figura 48 - Evolução do erro sistemático com o aumento da profundidade. No eixo X tem-se os valores do erro sistemático e no eixo Y tem-se as medidas de profundidade



Fonte: O Autor.

De maneira semelhante, a partir dos valores da média em cada intervalo de profundidade foi construído o gráfico de variação da precisão do modelo batimétrico, sendo apresentado na Figura 49. A informação apresentada no gráfico nos permite verificar que até os 4,00 metros de profundidade existe pouca variação no desvio padrão e, após esta profundidade nota-se um padrão irregular para esta variável estatística. Este comportamento nos faz supor que a eficiência da batimetria *multi-média* para o reservatório de Cachoeira foi até 4,00 m.

Figura 49 - Gráfico da variação do Desvio Padrão com o aumento da profundidade



Fonte: O Autor.

O primeiro subconjunto de pontos da batimetria testados apresenta profundidade compreendidas entre 2,00 m até 3,00 m. Inicialmente foram calculados os valores cujos pontos são erros grosseiros, seguindo a Equação 5.1. Após a eliminação desses erros foram recalculadas as estatísticas e avaliado o PEC altimétrico considerando que apenas 10% dos pontos amostrais podem apresentar erros altimétricos superior ao valor estabelecido no PEC testado.

A Tabela 11 apresenta as estatísticas calculadas para o conjunto de pontos com profundidades de 2,00 m até 3,00 m após a remoção dos pontos amostrais classificados como erros grosseiro.

Tabela 11 - Estatísticas calculadas para o conjunto de pontos da batimetria com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m, após remoção dos erros grosseiros

<i>Estatísticas para profundidades 2,00 m até 3,00 m</i>	
Média	0,551
Erro padrão	0,008
Mediana	0,527

Modo	0,576
Desvio padrão	0,610
Variância da amostra	0,373
Curtose	2,864
Assimetria	0,919
Intervalo	4,676
Mínimo	-1,176
Máximo	3,5
Soma	3076,854
Contagem	5587

Fonte: O Autor.

Comparando os resultados estatísticos apresentados nas Tabelas 10 e 11 vemos que 135 pontos foram classificados como erros grosseiros que, após a remoção do conjunto amostral trouxe uma melhora nos resultados estatísticos, diminuindo o valor do desvio padrão de 0,955 para 0,610 m.

Utilizando o conjunto de pontos após remoção dos erros grosseiros, realizou-se a avaliação do PEC altimétrico, considerando as classes A e B na escala 1:1.000 (equidistância entre as curvas de nível de 1,00 m) – Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe A para escala 1:1.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m

Variável analisada	Valores obtidos
Tamanho da amostra (pontos)	5587
Qualidade PEC Altimétrico testada	A
Escala pretendida	1:1.000
Valor do PEC Altimétrico aceito (m)	0,50
Total de pontos com erro acima da tolerância do PEC na classe testada	3111
Percentual dos pontos acima da tolerância do PEC na classe testada	56%
Resultado	Reprovado

Fonte: O Autor.

Tabela 13 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe B para escala 1:1.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m

Variável analisada	Valores obtidos
Tamanho da amostra (pontos)	5587
Qualidade PEC Altimétrico testada	B
Escala pretendida	1:1.000
Valor do PEC Altimétrico aceito (m)	0,60
Total de pontos com erro acima da tolerância do PEC na classe testada	2565
Percentual dos pontos acima da tolerância do PEC na classe testada	46%
Resultado	Reprovado

Fonte: O Autor.

Como os pontos testados para as classes A e B na escala 1:1.000 não foram aprovados (também não seriam para a classe C, que por brevidade deixamos de apresentar), realizou-se o mesmo procedimento acima descrito para o mesmo conjunto de pontos considerando a escala 1:2.000. As Tabelas 14 e 15 apresentam os resumos da avaliação do PEC altimétrico, considerando as classes A e B, na escala 1:2.000 (equidistância entre as curvas de nível de 2,00 m).

Tabela 14 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe A para escala 1:2.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m

Variável analisada	Valores obtidos
Tamanho da amostra (pontos)	5587
Qualidade PEC Altimétrico testada	A
Escala pretendida	1:2.000
Valor do PEC Altimétrico aceito (m)	1,00
Total de pontos com erro acima da tolerância do PEC na classe testada	946
Percentual dos pontos acima da tolerância do PEC na classe testada	17%
Resultado	Reprovado

Fonte: O Autor.

Tabela 15 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe B para escala 1:2.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 2,00 m e 3,00 m

Variável analisada	Valores obtidos
Tamanho da amostra (pontos)	5587
Qualidade PEC Altimétrico testada	B
Escala pretendida	1:2.000
Valor do PEC Altimétrico aceito (m)	1,20
Total de pontos com erro acima da tolerância do PEC na classe testada	556
Percentual dos pontos acima da tolerância do PEC na classe testada	10%
Resultado	Aprovado

Fonte: O Autor.

O resultado apresentado na Tabela 15 mostra que os pontos testados para a profundidade compreendida entre 2,00 m e 3,00 apresentam qualidade classe B no PEC altimétrico para escala 1:2.000.

O próximo conjunto de pontos a ser testado apresenta profundidades que variam entre 3,00 m e 4,00 m. Inicialmente para estes pontos foram identificados e removidos os erros grosseiros e recalculadas as estatísticas (Tabela 16).

Tabela 16 - Estatísticas calculadas para o conjunto de pontos da batimetria com profundidades compreendidas entre 3,00 m e 4,00 m, após remoção dos erros grosseiros

<i>Estatísticas para profundidades 3,00 m até 4,00 m</i>	
Média	0,863
Erro padrão	0,011
Mediana	0,861
Modo	0,819
Desvio padrão	0,753
Variância da amostra	0,567
Curtose	-0,033
Assimetria	0,018
Intervalo	4,820
Mínimo	-1,353
Máximo	3,467
Soma	4305,163
Contagem	4989

Fonte: O Autor.

Em análise das estatísticas apresentadas na Tabela 16 após remoção dos erros grosseiros para os conjuntos pontos testados, podemos ver que 50 pontos foram

classificados como erros grosseiros que, após serem removidos, trouxeram melhoras nas variáveis desvio padrão, curtose e assimetria, indicando uma normalidade da amostra.

Como os pontos amostrais com profundidades de 2,00 m a 3,00 m foram categorizados na classe B do PEC altimétrico na escala 1:2.000, tem-se que essa mesma classificação foi testada para os pontos com profundidades de 3,00 m a 4,00 m. A Tabela 17 apresenta o resumo da avaliação do PEC altimétrico, considerando B, na escala 1:2.000 (equidistância entre as curvas de nível de 2,00 m).

Tabela 17 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe B para escala 1:2.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 3,00 m e 4,00 m

Variável analisada	Valores obtidos
Tamanho da amostra (pontos)	4989
Qualidade PEC Altimétrico testada	B
Escala pretendida	1:2.000
Valor do PEC Altimétrico aceito (m)	1,20
Total de pontos com erro acima da tolerância do PEC na classe testada	1659
Percentual dos pontos acima da tolerância do PEC na classe testada	33%
Resultado	Reprovado

Fonte: O Autor.

Como descrito na seção 5.1 desta tese, ficou estabelecido que apenas as classes A e B do PEC altimétrico, nas escalas 1:1.000 ou 1:2.000 serão de interesse neste trabalho, dado que o produto pode ser utilizado na prática com qualidade. Mesmo assim, para os pontos com profundidades de 3,00 m a 4,00 m, foi realizada uma última análise do PEC altimétrico na escala 1:2.000, considerando a classe C. O resumo desta análise pode ser verificado na Tabela 18.

É importante dizer que o valor do PEC altimétrico considerado na classe C, para escala 1:2.000 é de 1,50 m.

Tabela 18 - Tabela resumo da avaliação do PEC altimétrico na classe B para escala 1:2.000 para os pontos com profundidades compreendidas entre 3,00 m e 4,00 m

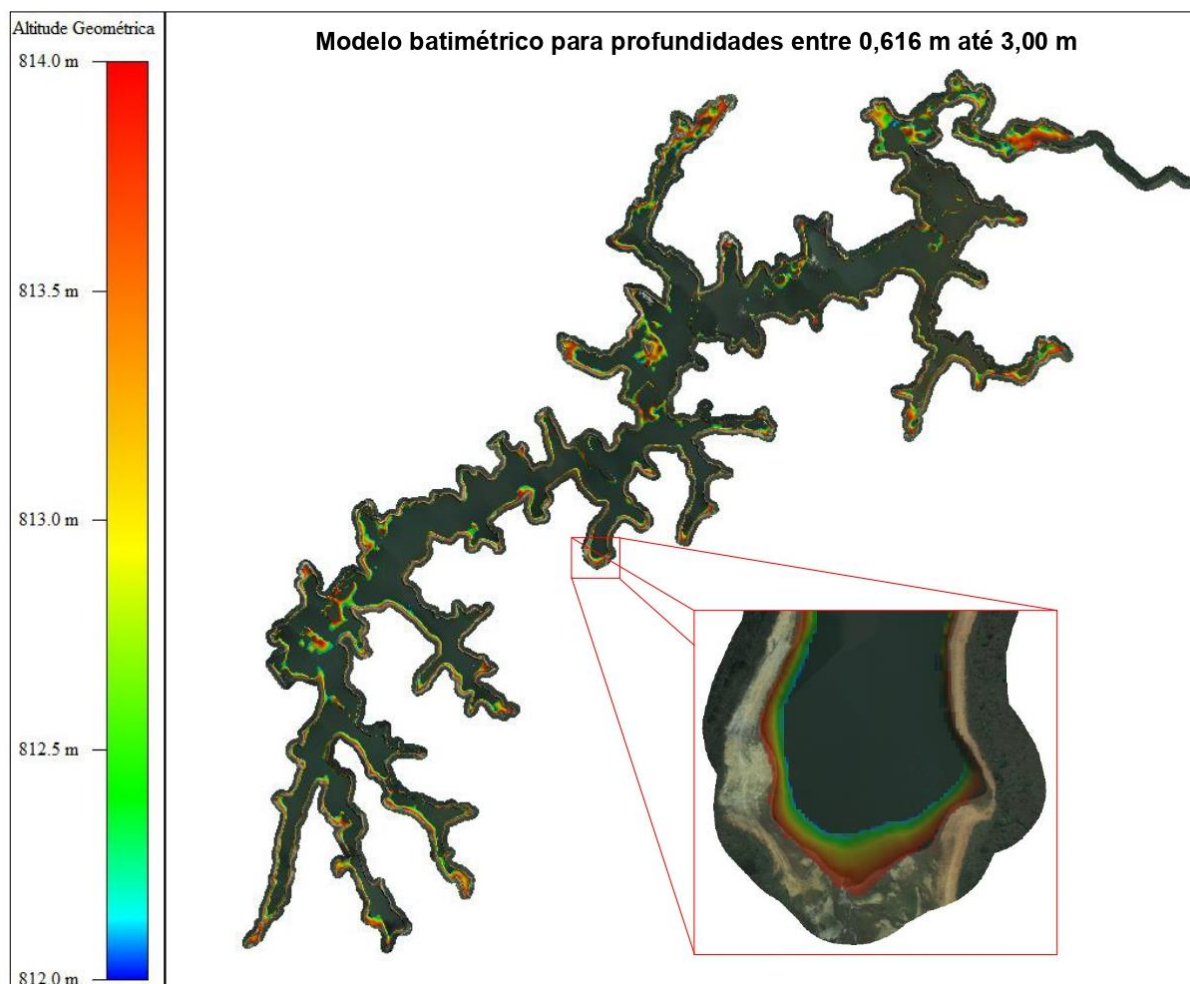
Variável analisada	Valores obtidos
Tamanho da amostra (pontos)	4989
Qualidade PEC Altimétrico testada	C
Escala pretendida	1:2.000
Valor do PEC Altimétrico aceito (m)	1,50
Total de pontos com erro acima da tolerância do PEC na classe testada	991
Percentual dos pontos acima da tolerância do PEC na classe testada	20%
Resultado	Reprovado

Fonte: O Autor.

Tabela 18 resume a classificação do PEC altimétrico, indicando que os pontos testados com profundidades entre 3,00 m e 4,00 m não atenderam aos critérios da classe C na escala 1:2.000. Portanto, conforme discutido nesta seção, a batimetria *multi-media* aplicada no reservatório de Cachoeira se mostrou eficaz para profundidades de até 3,00 m, permitindo a classificação do modelo gerado a partir da batimetria *multi-media* na classe B do PEC altimétrico para a mesma escala.

A Figura 50 apresenta o modelo derivado da batimetria *multi-media* para profundidades que variam 0,61 m até 3,00 m, englobando a parte seca e a parte do corpo d'água, ambas com qualidade altimétrica comprovada.

Figura 50 – Modelo topográfico com qualidade altimétrica comprovada para o reservatório de Cachoeira, para as profundidades compreendidas entre 0,61 m até 3,00 m, sobreposto ao ortomosaico

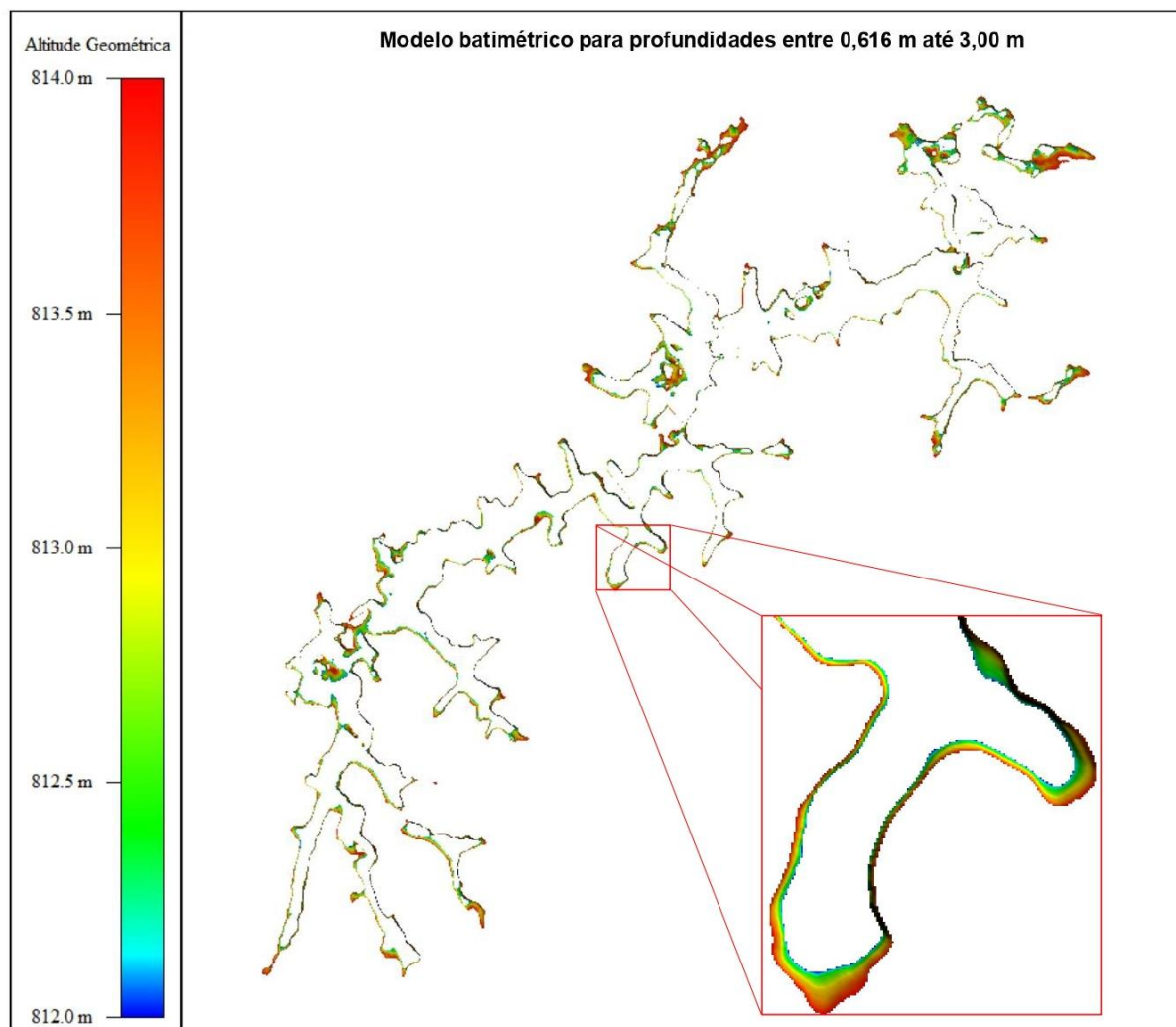


Fonte: O Autor.

Pela Figura 50, a área colorida destacada representa o modelo derivado da batimetria *multi-media* com qualidade comprovada (profundidades entre 0,661 m e 3,00 m). Esta área abrange tanto as partes secas quanto a região do corpo d'água do reservatório (zona de transição entre as duas partes). O modelo possui qualidade altimétrica (PEC B) na escala 1:2.000, e especialmente útil na borda do reservatório. Esta comprovação traz uma grande utilidade no modelo, que compreende na sua integração com dados de batimetria convencional em áreas do reservatório onde as informações são inexistentes devido às limitações do barco. Além disso, permite a extensão do modelo para as áreas secas, integrando-o com dados provenientes do perfilamento LiDAR topográfico, cuja limitação se dá pela não penetração no corpo d'água.

A Figura 51 ilustra apenas a região do modelo derivado da batimetria *multi-media* com qualidade comprovada, ou seja, apenas as partes com profundidades entre 0,616 m e 3,00 m são representadas.

Figura 51 - Modelo topográfico com qualidade altimétrica comprovada para o reservatório de Cachoeira, para as profundidades compreendidas entre 0,61 m até 3,00 m



Fonte: O Autor.

A Figura 51 mostra que as regiões no interior do modelo batimétrico gerado para reservatório de Cachoeira apresentam-se vazias de informação, sendo que isso corresponde às regiões do modelo que não foram classificados com qualidade esperada. Ou seja, estas regiões são as partes do reservatório com profundidades superiores a 3,00 m.

5.5. AVALIAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS TESTADOS COM VALORES DOS ERROS ALTIMÉTRICOS ACIMA DO VALOR DO PEC

Esta análise especial focou em tentar entender por qual razão os pontos da batimetria convencional, quando testados no PEC, excederam os limites de erro altimétrico da classe B para a escala 1:2.000, que é de 1,20 m. Analisamos 556 pontos, correspondentes aos 10% que foram reprovados na avaliação do PEC altimétrico. Para uma análise mais detalhada, esses pontos foram categorizados em cinco classes, com base em sua localização nas regiões do ortomosaico:

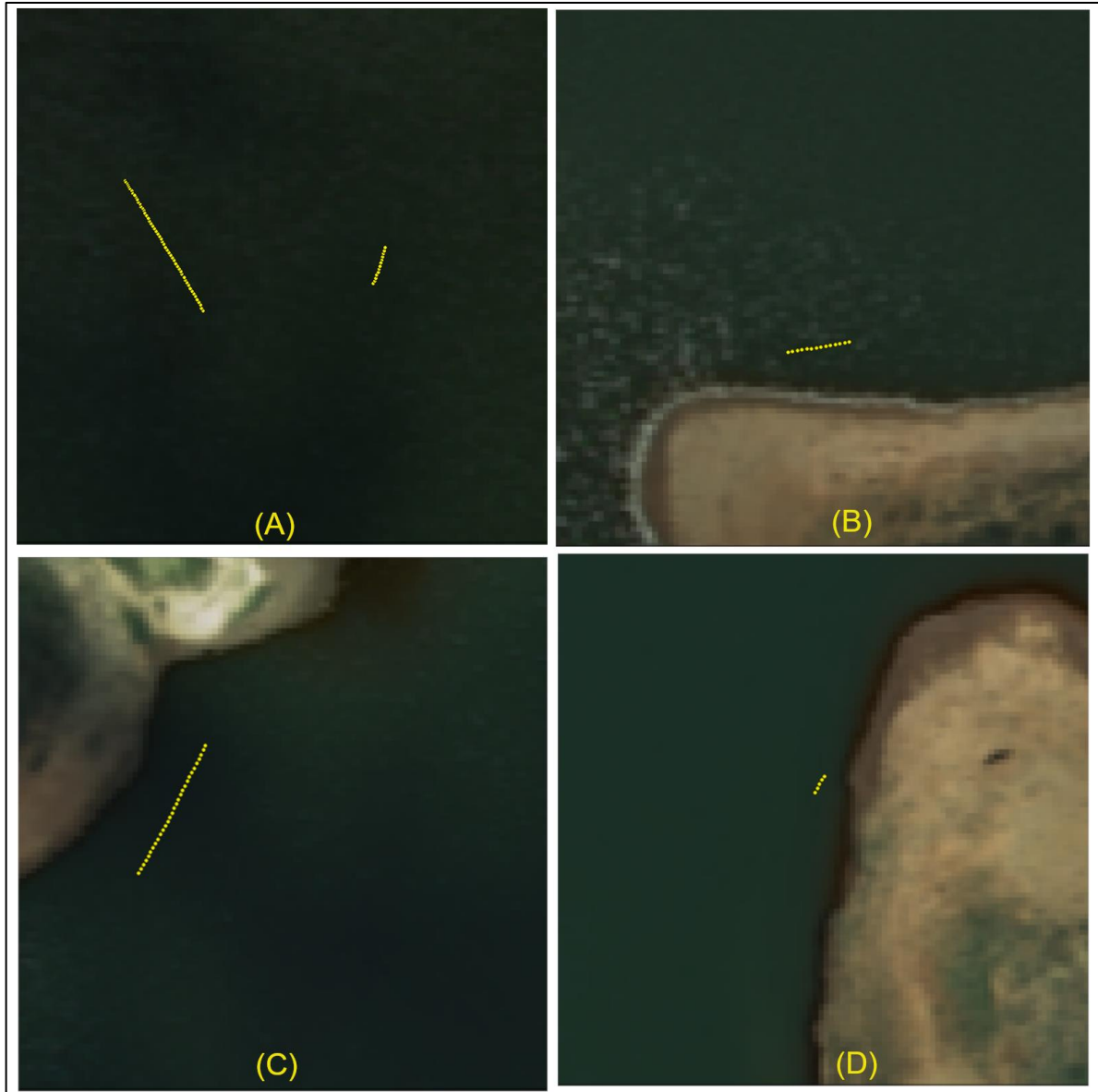
- **Classe I:** pontos em regiões onde efeito *sun-glint* foi corrigido;
- **Classe II:** pontos em regiões com correção parcial do efeito *sun-glint*;
- **Classe III:** pontos em áreas com sombras de nuvens sobre o corpo d'água;
- **Classe IV:** pontos próximos às bordas do reservatório; e
- **Classe V:** pontos em regiões sem observações relevantes.

A Figura 52 apresenta exemplos de cada classe, ilustrando as características encontradas no conjunto de pontos reprovados na avaliação do PEC altimétrico para profundidades de 2,00 m a 3,00 m.

A Tabela 13 apresenta a distribuição nominal e percentual dos pontos cujos erros altimétricos excederam os limites estabelecidos na classe B do PEC altimétrico na escala 1:2.000. A análise desses dados indica que, apesar da remoção ou atenuação do efeito *sun-glint* nas imagens aéreas (Classes I e II), este fator ainda impacta a precisão altimétrica do modelo derivado da batimetria *multi-media*. Isso é evidenciado pelo alto número de pontos reprovados no PEC, localizados em áreas do ortomosaico onde o efeito *sun-glint* foi aparentemente eliminado ou reduzido.

As sombras presentes em imagens aéreas não apenas ocultam objetos de interesse, mas também alteram os valores de brilho registrados na imagem. Esta ocorrência particularmente afetou os pontos que foram atribuídos a Classe III, dado que as sombras comprometeram o processo de correlação de *pixels* durante correlação de imagens.

Figura 52 – Exemplos das categorias de ocorrências identificadas no ortomosaico com valores dos erros altimétricos excedendo o estabelecido na classe B do PEC altimétrico para escala 1:2.000. (A) Região com o efeito *sun-glint* completamente corrigido. (B) Área com remanescente parcial do efeito *sun-glint*. (C) Região do reservatório com sombras e nuvens. (D) Pontos próximos às bordas do reservatório



Fonte: O Autor.

Tabela 19 - Quantitativos nominais e percentuais da classificação realizada para os pontos cujos erros altimétricos foram superiores ao valor estabelecido na avaliação do PEC altimétrico classe B na escala 1:2.000

Classes	Pontos reprovados na análise do PEC altimétrico para profundidades entre 2,00 m e 3,00 m	
	Quantidade de pontos	Percentual

Classe I	278	50%
Classe II	44	8%
Classe III	17	3%
Classe IV	206	37%
Classe V	11	2%
TOTAL	556	100%

Fonte: O Autor.

Os pontos que se localizam próximo das bordas do reservatório (Classe IV) podem ter apresentado erros altimétricos acima do valor estabelecido no PEC devido ao fato de haver uma diferença temporal entre a aquisição das imagens utilizadas na batimetria *multi-media* e os pontos registrados no levantamento batimétrico com *single-beam*.

Em conclusão, os pontos pertencentes a Classe V surgem por razões incertas. No contexto da tese, é possível especular que a variação no fundo topográfico, como assoreamento ou depósito de sedimentos, possa ter ocorrido no intervalo de 2 anos e 10 meses entre as duas coletadas de dados (imagens aéreas e batimetria convencional). Alternativamente, essas ocorrências podem ser atribuídas a fatores aleatórios inerentes ao processo. Em outros sensores, como o Lidar, é sabido que devido à grande quantidade de pontos, pode haver alguns fenômenos que impactam, como linhas de transmissão ou torres e animais.

5.6. AVALIAÇÃO DO EFEITO *SUN-GLINT* E OCORRÊNCIAS DE SOMBRAS NA GERAÇÃO DO MODELO DERIVADO DA BATIMETRIA *MULTI-MEDIA*

A análise realizada nesta subseção considera especificamente os pontos identificados como erros grosseiros (135 pontos) dentro da faixa de profundidade de 2,00 a 3,00 metros. Esses pontos, situados diretamente no corpo d'água do reservatório, parecem estar em áreas onde a ocorrência do efeito *sun-glint* não foi completamente corrigido, conforme sugere nossa hipótese inicial.

A verificação dos pontos identificados como erros grosseiros foi conduzida utilizando os ortomosaicos fotogramétricos, aquele gerado com as imagens afetadas pelo *sun-glint* como aquele que foi gerado com as imagens corrigidas. Primeiramente, analisou-se a localização de cada ponto sobre os ortomosaicos, categorizando-os em três situações distintas: pontos em áreas com *sun-glint* persistente mesmo após a

aplicação do algoritmo de correção deste efeito, pontos em áreas contendo *sun-glint* e afetadas também pela incidência de sombras de nuvens e regiões sem quaisquer anormalidades visíveis nos ortomosaicos. A Tabela 20 apresenta a quantidade de pontos existentes nas três ocorrências identificadas.

Tabela 20 - Classificação dos pontos identificados como erros grosseiros na avaliação do PEC em diferentes categorias de ocorrências

Classes <i>Outliers</i> – primeiro conjunto de pontos avaliados	Total de Pontos	Percentual
Região com <i>sun-glint</i>	93	69,69%
Região com <i>sun-glint</i> e sombra	21	15,16%
Região isenta de qualquer anormalidade	21	15,15%
TOTAL	135	100%

Fonte: O Autor.

A avaliação do primeiro conjunto de pontos corroborou a hipótese inicial: a maior parte dos pontos estava situada em áreas em que o efeito *sun-glint* não foi completamente eliminado, deixando vestígios no corpo d'água e comprometendo a precisão altimétrica da representação topográfica do relevo submerso. Além disso, identificaram-se pontos em regiões que apresentavam, simultaneamente, resquícios de *sun-glint* e sombras de nuvens sobre o corpo d'água. Esta coexistência de fenômenos – efeito *sun-glint* e sombras de nuvens – gera inconsistências nos processos fotogramétricos, uma vez que as sombras nas imagens reduzem a eficácia dos algoritmos de minimização do *sun-glint*. Inclusive, mesmo na ausência desses efeitos, a presença de sombras comprometeria a qualidade da correlação de imagens, o que já é um desafio comum em projetos fotogramétricos tradicionais em diversos contextos.

Por outro lado, em algumas regiões do reservatório isentas de anormalidades identificadas no corpo d'água, a razão pela qual certos pontos foram classificados como erros grosseiros não é clara, embora algumas hipóteses possam ser formuladas.

A correlação fotogramétrica em corpos d'água, mesmo com algoritmos avançados, continua sendo um desafio devido à homogeneidade das imagens, gerando a possibilidade de falsas correlações. Esse desafio é intensificado na identificação de

pontos homólogos em imagens de áreas aquáticas, especialmente se a superfície da água apresenta ondulações, o que, no caso do reservatório de Cachoeira, não foi observado.

Por outro lado, muitas vezes os valores altimétricos dos pontos gerados pela correlação de imagens em corpos d'água apresentam altos valores do erro médio quadrático, prejudicando orientação dos modelos fotogramétricos durante a aerotriangulação.

Como mencionado nesta tese, foi aplicado o filtro da mediana na nuvem de pontos fotogramétrica após executar a correção da refração da luz, de modo a eliminar ruídos e/ou pontos espúrios gerados durante a correlação de imagens. Sabe-se que o filtro da mediana é bastante agressivo na modificação dos dados originais, podendo ter contribuído na alteração significativa da altimetria destes pontos, provocando erros grosseiros.

Como última hipótese, não podemos deixar de citar aqui a alteração da topografia submersa nestas regiões, pois existe um intervalo tempo de 2 anos e 10 meses entre a aquisição das imagens fotogramétricas (e utilizadas na geração do modelo batimétrico) e a realização da batimetria convencional. Neste período, especificadamente nestas regiões, pode ter ocorrido alguma variação topográfica alterando o padrão de comparação; no entanto, normalmente, não se espera que tenha sido algo de grande magnitude.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do apresentado nesta tese, são trazidas neste capítulo algumas conclusões relevantes sobre a pesquisa realizada bem como sugestões para continuação de estudos relativos ao campo da batimetria por imagens.

O desenvolvimento do presente trabalho justificou-se pelo fato de que a batimetria óptica compreende um segmento ainda pouco explorado pelos pesquisadores pois requer um sólido conhecimento das técnicas existentes bem como o desenvolvimento de estratégias para minimizar a ocorrência de fatores naturais, dentre os quais merece destaque a reflexão especular em corpos d'água (*sun-glint*).

Dependendo da geometria formada entre Sol, o ângulo de incidência de raio de luz e a posição sensor utilizado (câmera), as imagens tomadas para um corpo d'água trazem registros do resultado da reflexão especular: *sun-glint*. Este efeito traz uma supersaturação dos valores de brilho nos *pixels* das imagens, ocluindo e degradando informações importantes ao desenvolvimento de estudos em corpos d'água.

O campo da batimetria por imagens trata o efeito do *sun-glint* como uma variável natural que influencia negativamente a qualidade da representação topográfica / batimétrica, fato este bem demonstrado nesta tese, havendo sido dado passos no sentido de corrigir este efeito, fato este que se atingiu, ainda que não totalmente, mas as pesquisas iniciadas devem prosseguir.

Ficou claro que quando se objetiva aplicar a técnica de batimetria *multi-media*, deve haver um planejamento de missão bem elaborado para tomada das imagens aéreas de modo com que elas sejam adquiridas em condições favoráveis possibilitando a menor ocorrência possível do efeito *sun-glint* nas cenas imageadas. No que se refere as melhores condições para aquisição das imagens, sugere-se realizar um planejamento de missão escolhendo períodos em que a elevação solar é mínima, mas conjugando com uma boa iluminação das cenas, o que nem sempre é uma tarefa trivial.

Cabe dizer também que, como em todo processo fotogramétrico, as imagens aéreas que serão utilizadas para a batimetria *multi-media* devem ser tomadas em momentos em que não haja ocorrência de nuvens e sombras, pois como visto na análise dos resultados, estes fatores degradam a qualidade topográfica o modelo batimétrico.

Assim, a principal contribuição desta tese está diretamente relacionada com a minimização dos efeitos desencadeados pelo efeito *sun-glint*, presentes nas imagens aéreas, e que se refletem no resultado (precisão) da representação topográfica derivada da técnica de batimetria *multi-media*. A remoção do efeito *sun-glint* nas imagens seguido da realização da correlação de imagens, como se mostrou, melhora significativamente a representação topográfica do modelo, fato este evidenciado pela comparação realizada entre o modelo digital gerado com as imagens contendo o *sun-glint* e após a remoção deste efeito.

Como se viu através do traçado de perfis (Figura 33), regiões que eram falsas ilhas foram representadas com um delineamento coerente com o que se esperava obter em um modelo derivado da batimetria convencional. O resultado obtido no modelo batimétrico, derivado das imagens corrigidas, mostrou que as pseudo-ilhas presentes no modelo obtido originalmente deixaram de existir, trazendo uma coerência conforme o esperado na representação do modelo batimétrico de um reservatório.

Outra inovação trazida nesta tese refere-se ao melhor resultado da geração da nuvem de pontos fotogramétrica (correlação de imagens), utilizando o algoritmo *Feature Based Matching* (FBM). Foi observado que, dentre os algoritmos de correlação de imagens estudados esse foi o que apresentou o melhor resultado na correlação de pontos sobre o corpo d'água (o que é uma tarefa de grande dificuldade), possibilitando a obtenção de uma nuvem de pontos fotogramétrica (malha) com um espaçamento de 3,5 m (satisfatório para a aplicação) e com incidência de menos ruídos.

Sobre a técnica da batimetria *multi-media* pode-se dizer que de fato, ela proporciona bons resultados na representação topográfica do relevo submerso para águas rasas. Na área do reservatório de Cachoeira, o modelo apresentou qualidade altimétrica (PEC B na escala 1:2.000) para até 3,00 metros de profundidades. Este resultado define o limiar de eficiência da técnica de batimetria *multi-media* para reservatórios de água no Brasil, com condições similares de turbidez da água e da tomada com a presença marcante de *sun-glint*.

A eficácia da técnica de batimetria *multi-media* em reservatórios é significativamente afetada pela turbidez da água. No Brasil, os reservatórios frequentemente contêm altas quantidades de partículas em suspensão e águas mais turvas, o que representa um desafio adicional para os algoritmos de correlação de imagens. Apesar dessas limitações, os resultados obtidos com a batimetria *multi-media* podem ser valiosos

como complemento à representação abrangente da área do reservatório, incluindo as partes secas e submersas ao corpo d'água, conforme mostrado neste trabalho. Além disso, existe a possibilidade de combinar esta tecnologia com a batimetria convencional e LiDAR topográfico, permitindo um mapeamento mais completo, especialmente nas bordas externas e em regiões mais rasas do reservatório.

Indo mais além, suprimem-se duas lacunas: o sensor LiDAR topográfico, comumente empregado na coleta de informações para a parte seca do reservatório, apresenta limitação de penetração dos pulso laser na água. Os SONARES por sua vez não trazem uma completa representação da topografia submersa por conta da limitação de navegação do barco, que por falta de profundidade de navegação do barco (calado) não se aproxima das bordas. Assim, as duas formas de coletas de informações descritas deixam uma lacuna na representação topográfica do reservatório, que podem ser preenchidas com qualidade utilizando o modelo derivado da batimetria *multi-media*, que conforme mostrado nesta tese apresenta qualidade altimétrica B no PEC, na escala 1:2.000, em águas rasas.

De uma maneira geral, o modelo obtido pode ser considerado uma alternativa de mapeamento do relevo submerso para regiões totalmente desprovidas desta informação. Ele pode ser empregado tanto no planejamento da execução de batimetria por SONAR como na navegação de pequenas embarcações, trazendo uma indicação das regiões mais rasas.

Para trabalhos futuros no campo da batimetria óptica, algumas recomendações e ideias podem ser elencadas, principalmente no que diz respeito à atenuação da ocorrência do efeito *sun-glint* nas imagens.

Quando se for adquirir imagens para aplicação de uma das técnicas de batimetria por imagem é importante realizar um planejamento de missão rigoroso, estabelecendo horários para o imageamento que tenham uma menor elevação solar. Desta maneira espera-se que se que a ocorrência do efeito *sun-glint* nas imagens seja mínimo.

Uma vez que a total ausência do efeito *sun-glint* em imagens tomadas para corpos d'água não ocorra, é sugerido a exploração de outros algoritmos de correção / atenuação deste efeito, avaliando sua eficiência no tratamento deste efeito.

É sugerido também testar inicialmente algoritmos que não dependam da banda espectral do infravermelho para correção do *sun-glint* (por exemplo algoritmos de

Deep Learning e Machine Learning), pois caso eles tragam bons resultados a batimetria *multi-media* poderia ser realizada utilizando imagens RGB, tomados por sensores embarcados em drones, que poderiam sobrevoar a borda do reservatório coletando imagens nas regiões seca e do corpo d'água, visando suprir a deficiência das tecnologias, conforme apontado. Esta solução certamente seria financeiramente mais viável podendo ser um fator motivador para que a comunidade venha a empregar essa técnica.

Uma pesquisa que poderia também ser desenvolvida, visando trazer melhores respostas a comunidade científica, seria a comparação das técnicas de batimetria por imagens (batimetria *multi-media* e batimetria multiespectral), aplicadas também em reservatórios de água.

Um trabalho envolvendo esta temática poderia trazer resultados indicando qual das técnicas utilizadas seria mais eficiente na representação do modelo batimétrico para águas rasas. Nesse sentido, foi planejado para esta pesquisa a aplicação da batimetria multiespectral, sendo inclusive adquirida uma imagem de acervo, tomada pelo satélite SPOT 6, mas não foi possível utilizar essa imagem por apresentar problemas nas bandas do infravermelho e pancromática. Como os recursos financeiros da pesquisa estavam limitados não foi possível adquirir uma outra imagem de outro sensor.

Como ideia, sugere-se realizar pesquisas utilizando a batimetria *multi-media* em outros contextos, como por exemplo em cidades localizadas nas áreas costeiras. Nestes ambientes, por mais que a parte marítima não seja objeto do mapeamento, as empresas de aerofotogrametria sempre adquirem as imagens extrapolando para a parte da água, sendo estes dados descartados na maioria das vezes. A aplicação da batimetria *multi-media* neste caso haveria a possibilidade de explorar a técnica no contexto marítimo, avaliando a interferência de outros tipos de variáveis na qualidade bem obter um produto com representação do relevo marítimo submerso para águas rasas.

A realização desta pesquisa, pioneira na aplicação da batimetria *multi-media* no contexto brasileiro, trouxe um aprendizado muito positivo para o pesquisador. O desenvolvimento desta tese, além de proporcionar a imersão em um universo não muito explorado no Brasil e no mundo, abriu um caminho de pesquisas em nosso meio, subsidiado também pelo estágio sanduíche de 12 meses, junto a um dos centros

de referências em pesquisas no campo da aerofotogrametria e sensoriamento remoto, que foi o IFP da Universidade de Stuttgart – Alemanha.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA – ANA. Subsídios para análise do pedido de outorga do sistema Cantareira e para a definição das condições de operação dos seus reservatórios. ANA, 2004. (Nota Técnica, 00000.016998/2004-00). Disponível em:<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos/cobranca/arquivos-cobranca/00000-016998-2018_nota_tecnica_conjunta_1_2018_daae_sas_rateio-de-vazoes-cantareira.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2018.
- BHANDARI, A. K.; KUMAR, A.; SINGH, G. K. Improved feature extraction scheme for satellite images using NDVI and NDWI technique based on DWT and SVD. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 9, p. 6949-6966, 2015. doi: 10.1007/s12517-014-1714-2.
- BLONDEL, P. **The Handbook of Sidescan Sonar**. 1. ed. Springer Praxis Books. 2009. 316 p.
- BRASIL. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas de cartografia nacional. Disponível em:<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- BUTLER, J.; LANE, S.; CHANDLER, J.; PORFIRI, E. Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments. **The Photogrammetric Record**, v. 17, n. 99, p. 419-439, 2002. doi: 10.1111/0031-868X.00196.
- CLARCKE, J. E. H.; LAMPLUGH, M.; CZOTTER, K. Multibeam water column imaging: Improved wreck least-depth determination. In: **Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference**, v. 1, p 10, 2006.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP. Dispõe sobre as informações dos dados telemétricos coletados e registrados diariamente para todos os sistemas de abastecimento de água. Disponível em:<<http://mananciais.sabesp.com.br/DadosTelemetricos>>. Acesso em: 17 jun. 2019.
- COSTANZA, R.; FARLEY, J. Ecological economics of coastal disasters: Introduction to the special issue. **Ecological Economics**, v. 63, n. 2–3, p. 249–253, 2007.
- DEWITT, B. A.; WOLF, P. R. **Elements of Photogrammetry (with Applications in GIS)**. 4. ed. McGraw Hill. 2000. 696 p.
- DIETRICH, J. T. Bathymetric structure-from-motion: Extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 2, p. 355-364, 2017. doi: 10.1002/esp.4060.
- EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling: acquisition, manipulation and applications**. 1. ed. Artech House Publishers. 2005. 270 p.

ENGSTROM, R.; AXELSSON, R. Laser bathymetry and its compliance with IHO S44. **SPECIAL PUBLICATION-HYDROGRAPHIC SOCIETY**, v. 42, p. Paper 18-Paper 18, 2001.

EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. Dispõe sobre dados para a exploração do espaço por meio de satélites. Disponível em:<
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/11/Sun_glint_over_the_ocean>.
Acesso em:03 jan. 2024.

FEIGELS, V. I.; KOPILEVICH, Y. I. Remote sensing of subsurface layers of turbid seawater with the help of an optical lidar system. In: UNDERWATER LIGHT MEASUREMENTS, 1993 St. Petersburg. **Proceedings of the SIPE 2048**. St. Petersburg, 1993, p. 9. doi: 10.1117/12.165508.

FINKL, C. W.; BENEDET, L.; ANDREWS, J. L. Interpretation of Seabed Geomorphology Based on Spatial Analysis of High-Density Airborne Laser Bathymetry. **Journal of Coastal Research**, v. 213, n. 213, p. 501–514, 2005.

FLEMMING, B. W. SIDE-SCAN SONAR-PRACTICAL GUIDE. **International Hydrographic Review**, v. 53, n. 1, p. 65-92, 1976.

FRANCESCHETTI, G; LANARI, R. **Synthetic aperture radar processing**. 1. ed. Florida. CRC Press. 1999. 322 p.

FRYER, J. G.; KNIEST, H. T. Errors in depth determination caused by waves in through-water photogrammetry. **The Photogrammetric Record**, v. 11, n. 66, p. 745-753, 1985. doi: 10.1111/j.1477-9730.1985.tb01326.x.

GARDNER, J.; CLARKE, J. H.; BURKE, L.; DAVID, A.; SCHMAHL, G. P.; GALLOWAY, J. Using multibeam sonar to map MPAs: Tool of the future for planning and management. **MPA News**, v. 4, n. 2, p. 1-4, 2002.

GEYMAN, E. C.; MALOOF, A. C. A Simple Method for Extracting Water Depth From Multispectral Satellite Imagery in Regions of Variable Bottom Type. **Earth and Space Science**, v. 6, n. 3, p. 527–537, 2019.

GIRNDT, U. **Analytische Behandlung von einigen Grundaufgaben der Zweimedien-Photogrammetrie**. 1. ed. Beck in Komm. 1973. 111 p.

GORDON, H. R.; WOUTERS, A. W. Some relationships between Secchi depth and inherent optical properties of natural waters. **Applied Optics**, v. 17, n. 21, p. 3341-3343, 1978.

GUENTHER, G. C.; GOODMAN, L. R. Laser applications for near-shore nautical charting. **Proceeding of the SPIE**, v. 160, p 174-183, 1978. doi: 10.1117/12.956863.

GUENTHER, G. C. **Airborne laser hydrography: System design and performance factors**. United States, 1985. *E-book*. 396 p. Disponível em: <
https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2811/noaa_2811_DS1.pdf>.
Acesso em: 8 jan. 2020.

GUENTHER, G. C.; CUNNINGHAM, A. G.; LAROCQUE, P. E.; REID, D. J. Meeting the accuracy challenge in airborne bathymetry. In: DEFENSE TECHNICAL INFORMATION CENTRE, 2000, Dresden. **Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR**. Dresden, 2000, p. 28.

GUENTHER, G. C. Airborne lidar bathymetry. In: Maune, D. F. **Digital elevation model technologies and applications: the DEM user's manual**. ASPRS, 2007, cap. 10 v. 2, p. 275-313.

HANSSSEN, R. F. **Radar interferometry: data interpretation and error analysis**. 1. ed. Springer Science & Business Media. 2001. 308 p.

HARRIS, W. D.; UMBACH, M. J. Underwater mapping. **Photogrammetry and Engineering**, v. 38, n. 8, p 765-775, 1972.

HIGGINS, S. A.; JAFFE, B. E.; FULLER, C. C. Reconstructing sediment age profiles from historical bathymetry changes in San Pablo Bay, California. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 73, n. 1–2, p. 165–174, 2007.

HÖHLE, J. **On the theory and practice of underwater photogrammetry**. 1971. Tese (Doutorado em Fotogrametria) – Universidade de Munique, Munique, 1971.

HUFF, L. C.; NOLL, G. T. **Digital Elevation Model Technologies and Applications: the DEM User's Manual**. 3. ed. Maryland. ASPRS. 2007. 563 p.

IDOETA, I. V. **Metodologia de elaboração automatizada de modelo digital de elevação e ortofoto em média e pequena escala**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Acesso em: 21 out. 2022.

IRISH, J. L.; WHITE, T. E. Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry. **Coastal Engineering**, v. 35, n. 1–2, p. 47–71, 1998.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campo. Parêntese. 2009. 597 p.

KAY, S.; HEDLEY, J. D.; LAVENDER, S. Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: A review of methods for visible and near-infrared wavelengths. **Remote sensing**, v. 1, n. 4, p. 697-730, 2009. doi: 10.3390/rs1040697.

KIBELE, J.; SHEARS, N. T. Nonparametric Empirical Depth Regression for Bathymetric Mapping in Coastal Waters. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**. v. 9, n. 11, p. 5130-5138, 2016. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2598152.

KOTOWSKI, R. Phototriangulation in multi-media photogrammetry. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 27, n. B5, p. 324-334, 1988.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. **Remote sensing and image interpretation**. 7. ed. John Wiley & Sons. 2015. 736 p.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. H.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3. ed. Porto Alegre. Bookman. 2013. 540 p.

LURTON, X.; LAMARCHE, G.; BROWN, C.; LUCIEERS, V.; RICE, G.; SCHIMEL, A.; WEBER, T. **Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars: guidelines and recommendations**. New Zeland, 2015. *E-book*. 200 p. Disponível em: <<http://geohab.org/wp-content/uploads/2014/05/BSWG-REPORT-MAY2015.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

LYZENGA, D. R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 2, n. 1, p. 71–82, 1981. doi: 110.1080/01431168108948342.

LYZENGA, D. R.; MALINAS, N. P.; TANIS, F. J. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 8, p. 2251–2259, 2006. doi: 10.1109/TGRS.2006.872909.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**. 1. ed. New York. Wiley. 2001. 496 p.

MURASE, T.; TANAKA, M.; TANI, T.; MIYASHITA, Y.; OHKAWA, N.; ISHIGURO, S.; YAMANO, H. A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. **Photogrammetric engineering & remote sensing**, v. 74, n. 9, p. 1129-1136, 2008. doi: 10.14358/PERS.74.9.1129.

NAIRN, R. Royal Australian Navy laser airborne depth sounder, the first year of operations. **The International Hydrographic Review**, v. 71, n. 1, p. 109-119, 1994.

NERO, M. A. Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Acesso em: 13 mai. 2023.

OLIVEIRA, R. A. **Geração automática de modelos digitais de superfície utilizando múltiplas imagens**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – UNESP, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013. Disponível em:<www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_oliveira_ra_2.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2019.

OKAMOTO, A.; HÖHLE, J. Allgemeines analytisches Orientierungsverfahren in der Zwei-und Mehrmedien-Photogrammetrie und seine Erprobung. **Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung**, v. 40, p. 1-12, 1972. ISSN 0934-0351.

PHILPOT, W. D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. **Applied Optics**, v. 28, n. 8, p. 1569-1578, 1989. doi: 10.1364/AO.28.001569.

PICKRILL, R. A.; TODD, B. J. The multiple roles of acoustic mapping in integrated ocean management, Canadian Atlantic continental margin. **Ocean and Coastal Management**, v. 46, n. 6–7, p. 601–614, 2003.

PRATLONG, J.; JERRAM, P.; TSIOLIS, G.; ARKESTEIJN, V.; DONEGAN, P.; KORTHOUT, L. TDI CMOS image sensor for Earth Observation. In: International Conference on Space Optics—ICSO 2018. **Proceeding of the International Society for Optics and Photonics**, v. 11180, p. 12, 2018. doi: 10.1117/12.2536152.

PUSHPARAJ, J.; HEGDE, A. V. Estimation of bathymetry along the coast of Mangaluru using Landsat-8 imagery. **The International Journal of Ocean and Climate Systems**, v. 8, n. 2, p. 71–83, 2017. doi: 10.1177/1759313116679672.

RINNER, K. Image law and orientation tasks in two-media photogrammetry. **Special issue 5 of the Austrian magazine for surveying**. v. 5, p. 51, 1948. doi: 10.1111/j.1477-9730.1994.tb00299.x.

SILVA, I.; SEGANTINI, P. C. L. **Topografia para Engenharia-Teoria e Prática de Geomática**. 1. ed. Rio de Janeiro. Campus. 2015. 412 p.

SEIDL, K.; RICHTER, K.; KNOBBE, J.; MAAS, H. G. Wide field-of-view all-reflective objectives designed for multispectral image acquisition in photogrammetric applications. In: **Optical Complex Systems: OCS11**. p. 8, 2011. doi: 10.1117/12.896754.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: principles and processing**. 1. ed. CRC Press. 2009. 590 p.

SKOGVIK, J.; AXELSSON, R. Experience and results from Swedish laser surveys and post-processing of laser bathymetry data. **SPECIAL PUBLICATION-HYDROGRAPHIC SOCIETY**, v. 42, p. 13, 2001.

STEINVALL, O. K.; KOPPARI, K. R.; KARLSSON, U. C. M. Airborne laser depth sounding: system aspects and performance. In: Ocean Optics XII. **Proceedings of the International Society for Optics and Photonics**, v. 12, p. 21, 1994. doi: 10.1117/12.190082.

STUMPF, R. P.; HOLDERIED, K.; SINCLAIRS, M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. **Limnology and Oceanography**, v. 48, p. 547–556, 2003. doi: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547.

TEWINKEL, G. C. Water depths from aerial photographs. **Photogrammetric Engineering**, v. 29, n. 6, p. 1037-1042, 1963.

THEILER, J. P.; CAI, D. M. Resampling approach for anomaly detection in multispectral images. In: **Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX**. v. 3, p. 10, 2003. doi: 10.1117/12.487069.

THOMAS, C.; RANCHIN, T.; WALD, L.; CHANUSSOT, J. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 5, p. 1301-1312, 2008. doi: 10.1109/TGRS.2007.912448.

VOSELMAN, G.; MAAS, H. G. **Airborne and terrestrial laser scanning**. 1. ed. CRC Press. 2010. 320 p.

WIMMER, M.; MANDLBURGUER, G.; RESSL, C.; PFEIFER, N. Estimation of high-resolution shallow water bathymetry via two-media-photogrammetry-a case study at the Pielach River. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. XLII-2, p. 8, 2016.

WESTAWAY, R. M.; LANE, S. N.; HICKS, D. M. The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. **Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group**, v. 25, n. 2, p. 209-226, 2000. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(200002).

WOZENCRAFT, J.; MILLAR, D. Airborne lidar and integrated technologies for coastal mapping and nautical charting. **Marine Technology Society Journal**, v. 39, n. 3, p. 27-35, 2005. doi: 10.4031/002533205787442440.

ZAAR, K. Dual media photogrammetry. **Special issue 4 of the Austrian Journal of Surveying – Special Issue**. v. 4., p. 48, 1948.

ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO PARA A CÂMARA DMC

Geometric Calibration Verification
DMC01-0167

**Geometric Calibration Verification Certificate**

Digital Mapping Camera (DMC)

DMC Serial Number: **DMC01-0167**

CBU Serial Number: **01000117**

For

FotoTerra Atividades de Aerolevanteamento LTDA

Rua Traipu, 509 – Pacaembu

Sao Paulo

Brazil





System Overview

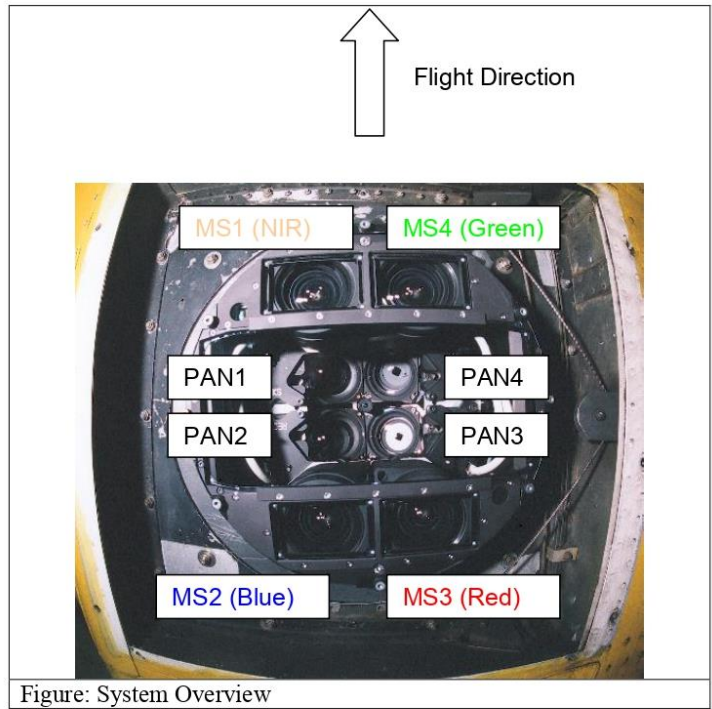


Figure: System Overview



Geometric Calibration Verification
DMC01-0167

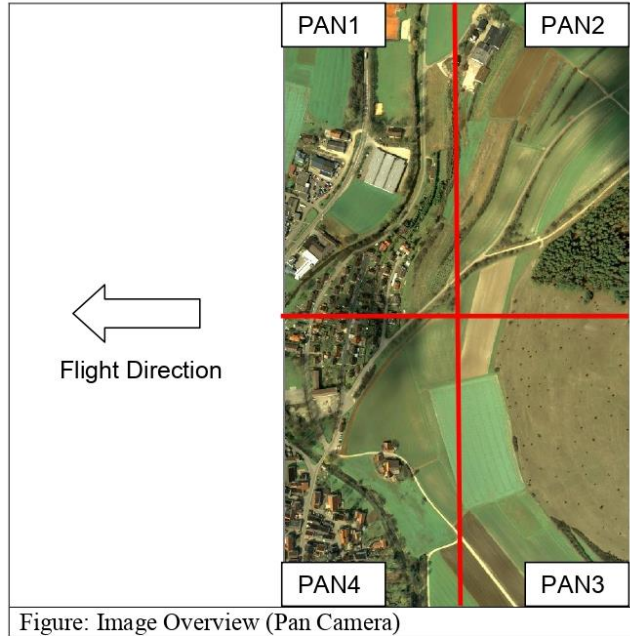


Figure: Image Overview (Pan Camera)

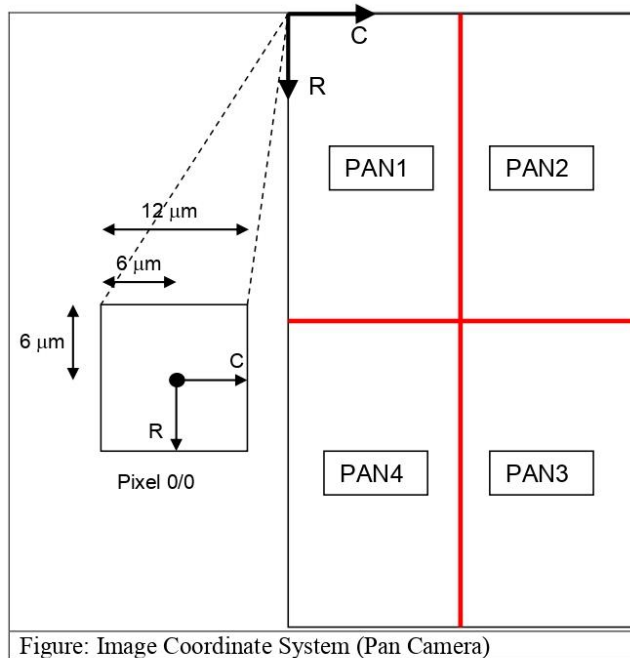


Figure: Image Coordinate System (Pan Camera)



Camera Parameter for Virtual Image (High Resolution)

Virtual Focal Length [mm]	120
Virtual Sensor Size [Pixel]	13824 x 7680
Virtual Pixel Size [μm]	12
Virtual Principle Point [mm]	$x_p = 0.0, y_p = 0.0$

Camera Parameter for Virtual Image (Color Resolution) before Version PPS 5.0.10.3

Virtual Focal Length [mm]	120 / 4.75
Virtual Sensor Size [Pixel]	3072 x 2048
Virtual Pixel Size [μm]	12
Virtual Principle Point [mm]	$x_p = -0.646, y_p = 0.646$

Camera Parameter for Virtual Image (Color Resolution) after Version PPS 5.1.10.3

Virtual Focal Length [mm]	30
Virtual Sensor Size [Pixel]	3456x1920
Virtual Pixel Size [μm]	12
Virtual Principle Point [mm]	$x_p = 0.0, y_p = 0.0$



Geometric Calibration Verification
DMC01-0167



Camera Serial Number and test flights

	Burn-in Flight: 26.07.2011	
	Verification Test Flight: 06.09.2013	
Camera	Serial Number	Calib. Date
PAN1	00109386	09.06.2011
PAN2	00109384	09.06.2011
PAN3	00109385	09.06.2011
PAN4	00109387	09.06.2011
MS1 (NIR)	00109487	09.05.2011
MS2 (Blue)	00109489	05.05.2011
MS3 (Red)	00109474	06.05.2011
MS4 (Green)	00109491	04.05.2011



Geometric Calibration Verification
DMC01-0167



**Camera Orientation PAN-Cameras (Verification Test Flight
06.09.2013)**

Camera (Serial Number)	X [m] (Standard Deviation)	Y [m] (Standard Deviation)	Z [m] (Standard Deviation)	Omega [Deg] (Standard Deviation)	Phi [Deg] (Standard Deviation)	Kappa [Deg] (Standard Deviation)
PAN1 (00109386)	0.064 (0)	-0.079 (0)	1000 (0)	18.000408 (0.001)	10.068159 (0.001)	87.087937 (0.001)
PAN2 (00109384)	-0.064 (0)	-0.079 (0)	1000 (0)	17.928015 (0.001)	-10.228932 (0.001)	92.589224 (0.001)
PAN3 (00109385)	-0.064 (0)	0.079 (0)	1000 (0)	-17.970165 (0.001)	-10.048774 (0.001)	-92.591395 (0.001)
PAN4 (00109387)	0.064 (0)	0.079 (0)	1000 (0)	-17.955835 (0.001)	10.206279 (0.001)	-86.863947 (0.001)

The data is connected to the virtual projection center of the virtual image.
The above Platform calibration values are initial values and are liable to slight fluctuations between project images and between different projects. The rotation axes of the angles are (in this order)

Omega	x-Axis
Phi	y-Axis
Kappa	z-Axis

The results of the Platform calibration were generated with DMC Postprocessing SW (PPS), Version 6.7, from Z/I Imaging postprocessing product suite.

Platform calibration verification performed by:

Z/I Employ Name: Chr. Müller
Dipl. Ing. Christian Müller

19.09.2013
Date



**Aerotriangulation Results (Verification Test Flight
19.06.2013)**

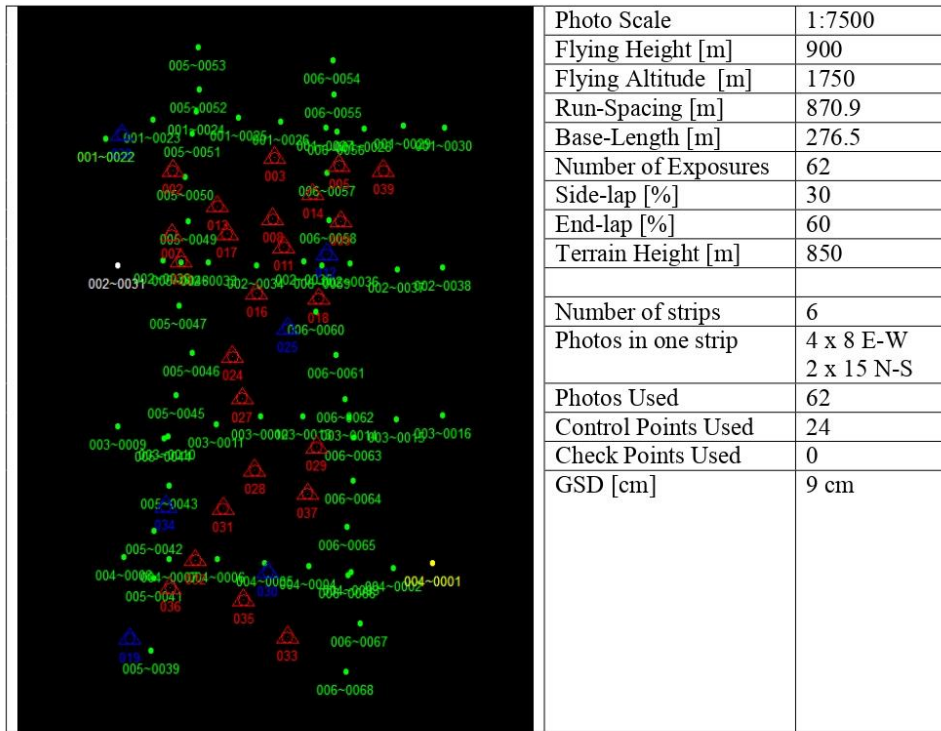


Photo Scale	1:7500
Flying Height [m]	900
Flying Altitude [m]	1750
Run-Spacing [m]	870.9
Base-Length [m]	276.5
Number of Exposures	62
Side-lap [%]	30
End-lap [%]	60
Terrain Height [m]	850
Number of strips	6
Photos in one strip	4 x 8 E-W 2 x 15 N-S
Photos Used	62
Control Points Used	24
Check Points Used	0
GSD [cm]	9 cm

Statistic results:

Matching results:	0 Weak Areas - covered with clouds
Whole Block	62 exposures used 0 exposures not used
Whole Block	Sigma relativ: 2.407 um
Whole Block	Sigma absolut: 2.467 um



Geometric Calibration Verification
DMC01-0167



Parameter	X/Omega	Y/Phi	Z/Kappa
RMS Control	0.038	0.033	0.025
RMS Check			
RMS Limits	0.070	0.070	0.100
Max Ground Residual	0.091	0.065	0.044
Residual Limits	0.100	0.100	0.120
Mean Std Dev Object			
RMS Photo Position	0.040	0.040	0.038
RMS Photo Altitude	0.004	0.003	0.004
Mean Std Dev Photo Position			
Mean Std Dev Photo Altitude			

Key Statistics	
Sigma:	2.5 um
RMS Image (x, y):	2.0, 1.8 um
Number of iterations:	2
Degrees of Freedom:	8676
Gross Image Blunders:	0
Gross Control Blunders:	0
Image Blunders:	0
Solution Status: Solution Successful.	

Current Count	
Control Points Used:	24
Check Points Used:	0
Photos Used:	62
Photos Not Used:	0
Image Points Used:	7074

Cameras used: (1)		
Camera Id	Lens Di..	Grids
DMC	Off	Off

Project Settings	
Linear: Meters	Refraction: Off
Angular: Degrees	Curvature: Off
WGS84 - Universal Transverse Mercator (m)	

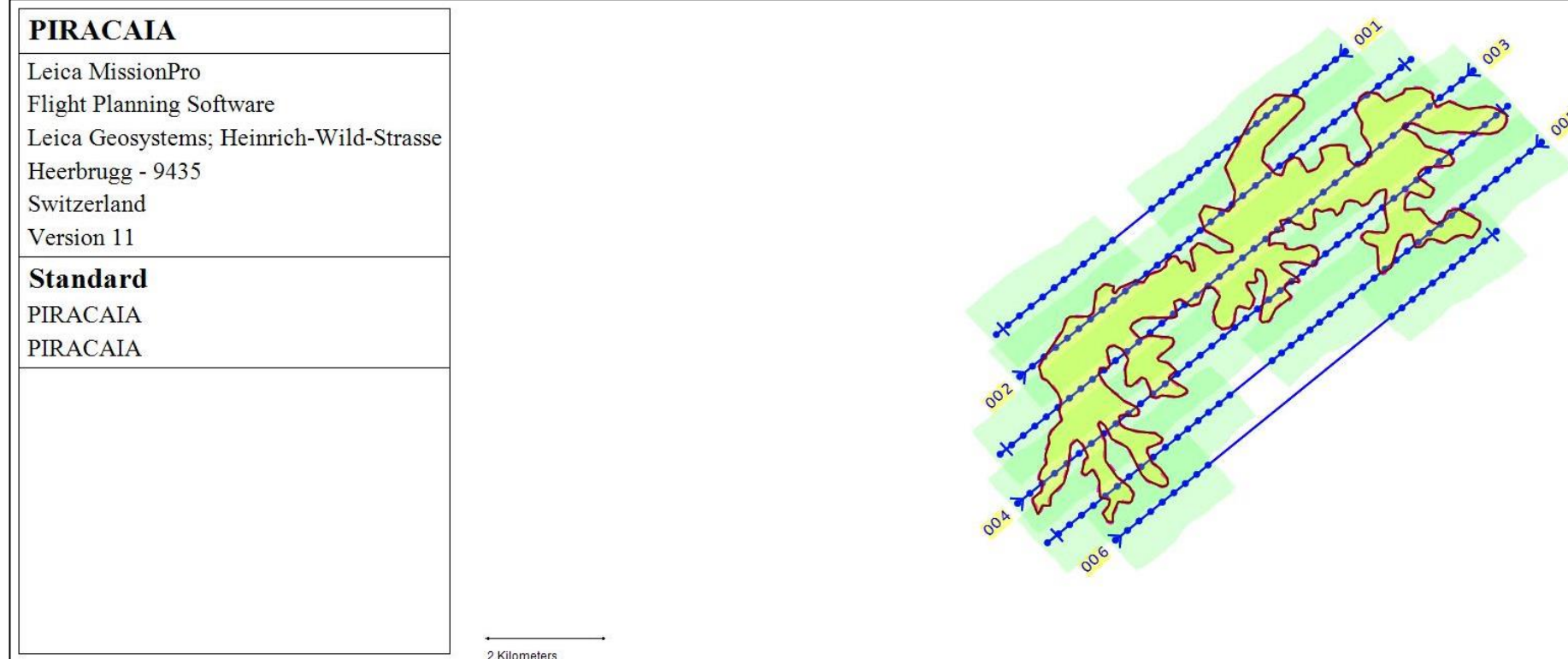
The results of the Aerotriangulation were generated with ImageStation Automatic Triangulation (ISAT), Version 2013, from Intergraph photogrammetric product suite.

With this certificate we confirm that DMC01-0167 is within geometric accuracy.

Aerotriangulation performed by:



Z/I Employ Name: Chr. Müller
Dipl. Ing. Christian Müller



19.09.2013
Date



APÊNDICE A – PLANO DE VOO FOTOGRAMÉTRICO PARA O RESERVATÓRIO DE CACHOEIRA



PIRACAIA													
Leica MissionPro Flight Planning Software Leica Geosystems; Heinrich-Wild-Strasse Heerbrugg - 9435 Switzerland Version 11													
Standard													
PIRACAIA													
PIRACAIA													
Flight Plan	AOI	Flight Line #	Flight Line Label	Status	Line Direction	Length	Alt MSL	Min Alt AGL	Max Alt AGL	# Active Events	Min GSD	Max GSD	Estimated flight time
PIRACAIA	RESERVATORIO_PIRACAIA	1	001	Active	228,2	7,67	5883	695,00	1000,00	33	7	10	109,1
PIRACAIA	RESERVATORIO_PIRACAIA	2	002	Active	48,2	8,59	5899	768,00	1000,00	36	8	10	106,3
PIRACAIA	RESERVATORIO_PIRACAIA	3	003	Active	228,2	10,39	5902	803,00	1000,00	42	8	10	120,3
PIRACAIA	RESERVATORIO_PIRACAIA	4	004	Active	48,2	10,76	5942	846,00	1000,00	43	8	10	123,0
PIRACAIA	RESERVATORIO_PIRACAIA	5	005	Active	228,2	10,85	5942	711,00	1000,00	43	7	10	143,7
PIRACAIA	RESERVATORIO_PIRACAIA	6	006	Active	48,2	8,36	5978	740,00	1000,00	20	7	10	124,4



APÊNDICE B – MONOGRAFIA DOS PONTOS DE APOIO SUPLEMENTAR

MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_01	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 02 38,5406	h (m): 827,818 σ_h (m): 0,010
λ : -46 19 36,7019	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,620
Altura da Antena (m): 1,860	H (m): 830,438
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 364056,860	σ_E (m): 0,006
N (m): 7450988,877	σ_N (m): 0,006
	
<p>Descrição: Ponto localizado no canto de uma cerca de alambrado na esquina entre as duas ruas sem denominação.</p>	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_02	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 01 22,5883	h (m): 886,347 σ_h (m):0,011
λ : -46 18 10,1122	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,580
Altura da Antena (m): 1,618	H (m): 888,927
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 366500,685	σ_E (m): 0,008
N (m): 7453346,980	σ_N (m): 0,008
	
Descrição: Ponto localizado no canto da calçada da piscina de uma chácara.	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_03	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -22 59 45,6541	h (m): 862,421 σ_h (m):0,022
λ : -46 16 00,6953	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,520
Altura da Antena (m): 1,860	H (m): 864,941
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 370159,060	σ_E (m): 0,008
N (m): 7456360,526	σ_N (m): 0,008
	
Descrição: Ponto localizado no mourão esquerdo da porteira que dá acesso ao curral.	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_04	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 04 01,1859	h (m): 806,637 σ_h (m):0,008
λ : -46 19 38,9974	$N_{MAPGEO2010}$ (m): -2,650
Altura da Antena (m): 1,819	H (m): 809,287
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 364014,592	σ_E (m): 0,004
N (m): 7448446,453	σ_N (m): 0,004
	
Descrição: Ponto localizado no mourão da porteira de entrada da propriedade que se localiza na Estrada Municipal André Franco Montoro.	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_05	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 00 17,0894	h (m): 848,808 σ_h (m): 0,026
λ : -46 15 14,5928	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,520
Altura da Antena (m): 1,286	H (m): 851,328
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 371479,995	σ_E (m): 0,013
N (m): 7455405,016	σ_N (m): 0,013
	
Descrição: Ponto localizado no canto direito da base do poste que se encontra deitado sobre o pasto.	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_06	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 04 37,5048	h (m): 844,916 σ_h (m): 0,008
λ : -46 18 49,3420	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,650
Altura da Antena (m): 1,189	H (m): 847,566
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 365437,739	σ_E (m): 0,004
N (m): 7447342,200	σ_N (m): 0,004
	
<p>Descrição: Ponto localizado no canto esquerdo frontal da tampa do bueiro que se encontra na beira da estrada sem denominação.</p>	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_07	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 02/11/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 02 34,3703	h (m): 845,071 σ_h (m):0,033
λ : -46 16 28,5868	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,580
Altura da Antena (m): 0,000	H (m): 847,651
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 367405,542	σ_E (m): 0,014
N (m): 7448332,445	σ_N (m): 0,014
	
Descrição: Ponto localizado no canto esquerdo do telhado do galinheiro que se localiza na lateral da propriedade.	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_08	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreo: 02/11/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 02 34,3703	h (m): 874,261 σ_h (m):0,018
λ : -46 16 28,5868	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,580
Altura da Antena (m): 0,200	H (m): 876,841
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 369410,059	σ_E (m): 0,013
N (m): 7451164,725	σ_N (m): 0,013
	
Descrição: Ponto localizado no canto do telhado de entrada do chiqueiro, perto do barranco.	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_09	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 02/11/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 01 44,8808	h (m): 855,032 σ_h (m):0,011
λ : -46 15 22,9091	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,550
Altura da Antena (m): 1,170	H (m): 857,582
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 371266,377	σ_E (m): 0,004
N (m): 7452702,950	σ_N (m): 0,004
	
<p>Descrição: Ponto localizado diretamente no solo, próximo de um conjunto de gramíneas. Este ponto encontra-se mais precisamente na transição entre os tipos de solo visto na imagem, que pode ser identificado pela diferença de cores.</p>	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_10	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 01 55,8765	h (m): 854,911 σ_h (m): 0,017
λ : -46 17 59,6268	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,580
Altura da Antena (m): 0,934	H (m): 857,491
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 366808,263	σ_E (m): 0,011
N (m): 7452325,834	σ_N (m): 0,011
	
Descrição: Ponto localizado sobre um pequeno tronco de madeira localizado de frente ao jardim cercado por pedras na entrada da propriedade.	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_12	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 02/11/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 02 09,2333	h (m): 891,027 σ_h (m): 0,010
λ : -46 16 23,1554	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,570
Altura da Antena (m): 1,490	H (m): 893,597
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 369557,928	σ_E (m): 0,008
N (m): 7451939,168	σ_N (m): 0,008
	
<p>Descrição: Ponto localizado sobre o ladrilho do lado esquerdo, próximo da estrada que dá acesso a entrada da propriedade.</p>	



MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_14	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreo: 02/11/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 01 23,5771	h (m): 946,498 σ_h (m):0,017
λ : -46 14 47,8442	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,530
Altura da Antena (m): 0,000	H (m): 949,028
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 372258,946	σ_E (m): 0,007
N (m): 7453366,678	σ_N (m): 0,007
	
<p>Descrição: Ponto localizado sobre uma pedra (mais alta) localizada na beira da estrada. As pedras se encontram no lado oposto da estrada onde se localizam as linhas de alta tensão.</p>	


MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_15	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 04 25,7940	h (m): 840,728 σ_h (m): 0,001
λ : -46 19 15,4194	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,650
Altura da Antena (m): 1,420	H (m): 843,378
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 364692,421	σ_E (m): 0,001
N (m): 7447695,687	σ_N (m): 0,001
	
<p>Descrição: Ponto localizado sobre a estrutura metálica que fixa o guard rail próximo da estrada Municipal André Franco Montoro. Esta estrutura metálica que se encontra posicionado o ponto fica próximo do arbusto identificado nas imagens.</p>	

MONOGRAFIA PONTO DE CONTROLE HORIZONTAL E VERTICAL	
Nome do Ponto: PC_16	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 03 15,4846	h (m): 814,862 σ_h (m): 0,022
λ : -46 19 28,7976	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,630
Altura da Antena (m): 1,497	H (m): 817,492
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 364292,130	σ_E (m): 0,008
N (m): 7449854,670	σ_N (m): 0,008
	
<p>Descrição: Ponto localizado sobre o último pilar da cerca da propriedade que se encontra voltada para a estrada Municipal André Franco Montoro.</p>	

MONOGRAFIA DO PONTO DE VERIFICAÇÃO - PV	
Nome do Ponto: PV_03	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 02 03,3477	h (m): 890,328 σ_h (m): 0,024
λ : -46 18 49,9613	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,600
Altura da Antena (m): 1,620	H (m): 892,928
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 365377,527	σ_E (m): 0,015
N (m): 7452083,263	σ_N (m): 0,015
	
<p>Descrição: Ponto localizado no pilar de concreto que se encontra fixado o portão que dá acesso a clínica de recuperação.</p>	

MONOGRAFIA DO PONTO DE VERIFICAÇÃO - PV	
Nome do Ponto: PV_05	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 00 19,3170	h (m): 860,824 σ_h (m):0,016
λ : -46 14 57,3836	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,510
Altura da Antena (m): 0,850	H (m): 863,334
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 371970,540	σ_E (m): 0,011
N (m): 7455340,688	σ_N (m): 0,011
	
Descrição: Ponto localizado sobre o cupinzeiro mais próximo do torre de alta tensão.	

MONOGRAFIA DO PONTO DE VERIFICAÇÃO - PV	
Nome do Ponto: PV_06	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 21/10/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 04 10,6619	h (m): 879,463 σ_h (m): 0,016
λ : -46 18 17,9753	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,640
Altura da Antena (m): 1,405	H (m): 882,103
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 366322,940	σ_E (m): 0,012
N (m): 7448175,769	σ_N (m): 0,012
	
<p>Descrição: Ponto localizado no canto da borda da piscina próximo da escada. Esta piscina pertence a pousada “Beira do Lago”.</p>	

MONOGRAFIA DO PONTO DE VERIFICAÇÃO - PV	
Nome do Ponto: PV_07	Localização do Ponto: Reservatório Cachoeira – Piracaia/ SP
Software de Proc.: Topcon Tools 8.2	Data do Rastreio: 02/11/2018
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
φ : -23 01 41,9893	h (m): 841,375 σ_h (m):0,011
λ : -46 15 48,0142	$N_{MAPGEO2015}$ (m): -2,550
Altura da Antena (m): 1,180	H (m): 843,925
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 370550,973	σ_E (m): 0,008
N (m): 7452785,729	σ_N (m): 0,008
	
<p>Descrição: Ponto localizado no canto direito de um objeto de concreto (aparentemente uma fonte de água desativada) localizado próximo da estrada que dá acesso a uma pequena mercearia/ bar.</p>	

APÊNDICE C – ALGORITMO DE LYZENGA PARA CORREÇÃO/ATENUAÇÃO DO EFEITO *SUN-GLINT* ESCRITO EM PYTHON

```

-*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Mon Mar 11 09:42:09 2019

@author: cesar
"""
## Importing libraries.

print('Starting the Sun-Glint correction for Multispectral Images...')

from osgeo import gdal
#from scipy.ndimage import gaussian_filter as gf
from scipy.signal import medfilt as med
import subprocess as sub
import numpy as np
import os
import sys

gdal.AllRegister()

## Opening the Sun-Glint sample (tif format) using GDAL.

print('Opening Sun-Glint samples...')

ds_rgb = gdal.Open('Sun-Glint_Sample_rgb_3.tif')
ds_nir = gdal.Open('Sun-Glint_Sample_nir_3.tif')
if ds_rgb and ds_nir is None:
    print('Unable to open Sun_Glint_Sample.tif')
    sys.exit(1)

## Getting information about raster file.

rows = ds_rgb.RasterYSize
cols = ds_rgb.RasterXSize
bands = ds_rgb.RasterCount

## Calculating values for covariances and coefficients relating the sun-glint signal in band i to that in
the Nir channel (band j).

print('Calculating Variance-Covariance Matrix and coefficients relating the sun-glint correction...')

coef_arr = []

for i in range(bands-1):
    i += 1
    data_ds = ds_rgb.GetRasterBand(i).ReadAsArray(0, 0, cols, rows).ravel()
    data_ds = med(data_ds)
    data_nir = ds_nir.GetRasterBand(1).ReadAsArray(0, 0, cols, rows).ravel()

```

```

data_nir = med(data_nir)
cov = np.cov(data_ds, data_nir, bias = True)
print('Matrix Covariances R, G, B: ', cov)
coef = cov[0,1] / cov [1,1]
print('Coefficients to sun-glint correction: ', coef)
coef_arr.append(coef)
a = coef_arr

## Opening a Deep-Water sample (tif format) using GDAL.

print('Opening Deep Water sample...')

dw = gdal.Open('Deep_Water_Sample_2.tif')
if dw is None:
    print('Unable to open Deep_Water_Sample.tif')
    sys.exit(1)

## Getting information about raster file.

rows = dw.RasterYSize
cols = dw.RasterXSize
bands = dw.RasterCount

## Separating Nir band of Deep-Water sample and calculating the mean value just for Nir band.

print('Calculating the mean value for Nir band of Deep Water sample...')

nir_dw = dw.GetRasterBand(1).ReadAsArray(0, 0, cols, rows)
nir_dw = ((med(nir_dw).mean()) - 4433)

## Opening just one raster files to get informations like size, rows, cols

os.chdir('D:/Implementacao_Lyzenga/raw_data_rgb_nir/')
information = gdal.Open('002_0004.tif')
rows = information.RasterYSize
cols = information.RasterXSize
bands = information.RasterCount

output = []

for i in range(2): ## Don't forget change of amount the raster files that will be correcting
    i += 1
    print('Opening raster file from reservoir...')
    os.chdir('D:/Implementacao_Lyzenga/raw_data_rgb_nir/')
    text_file = open('list.txt', 'r')
    line = text_file.read().split()
    size = len(line)
    nome = line[i-1]
    ds_res_rgb = gdal.Open(nome)
    # rows = ds_res_rgb.RasterYSize
    # cols = ds_res_rgb.RasterXSize

```

```

# bands = ds_res_rgb.RasterCount
print('Reading red band of imagem ' + nome)
banda_red = ds_res_rgb.GetRasterBand(1).ReadAsArray(0, 0, cols, rows)
print('Reading green band of image ' + nome)
banda_green = ds_res_rgb.GetRasterBand(2).ReadAsArray(0, 0, cols, rows)
print('Reading blue band of image ' + nome)
banda_blue = ds_res_rgb.GetRasterBand(3).ReadAsArray(0, 0, cols, rows)
print('Reading nir band of image ' + nome)
nir_band = ds_res_rgb.GetRasterBand(4).ReadAsArray(0, 0, cols, rows)
print('Opening NDWI raster file for image ' + nome)
os.chdir('D:/Implementacao_Lyzenga/ndwi/')
text_file_ndwi = open('list.txt', 'r')
line_ndwi = text_file_ndwi.read().split()
size_ndwi = len(line_ndwi)
nome_ndwi = line_ndwi[i-1]
ds_ndwi = gdal.Open(nome_ndwi)
# rows_ndwi = ds_ndwi.RasterYSize
# cols_ndwi = ds_ndwi.RasterXSize
# bands_ndwi = ds_ndwi.RasterCount
ndwi = ds_ndwi.GetRasterBand(1).ReadAsArray(0, 0, cols, rows)
print('Applying the sun-glint correction for image ' + nome)
for ii in range(rows):
    for jj in range(cols):
        if ndwi[ii,jj] >= 0.10:
            valor_corr_red = banda_red[ii,jj] - (a[0] * (nir_band[ii,jj] - nir_dw))
            banda_red[ii,jj] = valor_corr_red
            valor_corr_green = banda_green[ii,jj] - (a[1] * (nir_band[ii,jj] - nir_dw))
            banda_green[ii,jj] = valor_corr_green
            valor_corr_blue = banda_blue[ii,jj] - (a[2] * (nir_band[ii,jj] - nir_dw))
            banda_blue[ii,jj] = valor_corr_blue
            name1 = 'Band_01' + '_corrected_' + nome
            name2 = 'Band_02' + '_corrected_' + nome
            name3 = 'Band_03' + '_corrected_' + nome
            output = gdal.GetDriverByName('Gtiff').Create('D:/Implementacao_Lyzenga/rgb_corrected/' +
name1, cols, rows, 1, gdal.GDT_Int16)
            output.GetRasterBand(1).WriteArray(banda_red)
            output = gdal.GetDriverByName('Gtiff').Create('D:/Implementacao_Lyzenga/rgb_corrected/' +
name2, cols, rows, 1, gdal.GDT_Int16)
            output.GetRasterBand(1).WriteArray(banda_green)
            output = gdal.GetDriverByName('Gtiff').Create('D:/Implementacao_Lyzenga/rgb_corrected/' +
name3, cols, rows, 1, gdal.GDT_Int16)
            output.GetRasterBand(1).WriteArray(banda_blue)
            output.FlushCache()
            os.chdir('D:/Implementacao_Lyzenga/rgb_corrected/')
            merge_command = ['python', 'gdal_merge.py', '-o',
'D:/Implementacao_Lyzenga/rbg_merged/rgb_merged_' + nome, '-separate', 'Band_01_corrected_'
+ nome, 'Band_02_corrected_' + nome, 'Band_03_corrected_' + nome, '-co', 'PHOTOMETRIC=RGB', '-
co', 'COMPRESS=NONE']
            sub.call(merge_command)
            print('The image rgb_merged_' + nome + ' was created with successful!!!!')
## print('Finished the sun glint correction for image ' + nome)
output = None

```



```
#os.chdir('D:/Implementacao_Lyzenga/rgb_corrected/')

#for i in range(2): ## Insert the amount images that was corrected
#  i += 1
#  nome = line[i-1]
#  merge_command = ['python', 'gdal_merge.py', '-o',
'D:/Implementacao_Lyzenga/rbg_merged/rgb_merged_' + nome, '-separate', 'Band_01_corrected_'
+ nome, 'Band_02_corrected_' + nome, 'Band_03_corrected_' + nome, '-co', 'PHOTOMETRIC=RGB', '-
co', 'COMPRESS=NONE']
#  sub.call(merge_command)
#  print('The image rgb_merged_' + nome + ' was created with successful!!!!')

print('Finished the Sun-Glint correction!!! Check the results on the folder "rgb_merged"!!!!')
```